

№10
(140)
2024

ISSN 2307-6046



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»

Всероссийский научно-исследовательский институт
авиационных материалов



ТРУДЫ ВИАМ



ТРУДЫ ВИАМ

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЭЛЕКТРОННЫЙ ЖУРНАЛ

ИЗДАЕТСЯ С 2013 ГОДА

№ 10 (140) октябрь 2024

Учредитель периодического издания:

НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ

Редакционный совет

Председатель совета – главный редактор:

Каблов Е.Н. академик РАН, профессор (НИЦ «Курчатовский институт»)

Заместитель председателя совета – заместитель главного редактора:

Антипов В.В. докт. техн. наук (НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ)

Члены совета:

Демонис И.М.	канд. техн. наук
Кокорин В.Н.	докт. техн. наук, профессор (Ульяновский государственный технический университет)
Кондрашов С.В.	докт. техн. наук (МГТУ им. Н.Э. Баумана)
Лаптев А.Б.	докт. техн. наук (НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ)
Леонтьев Л.И.	академик РАН, профессор (РАН)
Ночовная Н.А.	докт. техн. наук (НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ)
Пенязьков О.Г.	академик НАН Беларуси, профессор (Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова, Беларусь)
Райтер Г.	докт. наук (ALD Vacuum Technologies GmbH, Германия)
Старцев В.О.	докт. техн. наук (НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ)
Стороженко П.А.	академик РАН, профессор (АО «ГНИИХТЭОС»)
Тимофеев А.Н.	докт. техн. наук (ОАО «Композит»)
Аграфенина Е.А.	ответственный секретарь (НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ)

Издатель: НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ

Редакция:

редакторы – Е.А. Аграфенина, Н.В. Ананьева;
корректор – И.С. Туманова; верстка – М.С. Закржевская

Адрес редакции:

Россия, 105005, г. Москва, ул. Радио, д. 17
Тел.: +7 (499) 263-89-50, +7 (499) 263-87-37; факс: +7 (499) 267-86-09;
e-mail: admin@viam.ru; сайт: <http://viam-works.ru>

Свидетельство о регистрации средства массовой информации Эл № ФС77-82678 от 27.01.2022

Распространяется бесплатно посредством информационно-телекоммуникационной сети Интернет.

Журнал включен в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата и доктора наук.

Журнал входит в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ),
реферативно-информационную базу данных RSCI (Russian Science Index на платформе Web of Science)
Журнал входит в Международную ассоциацию издателей (PILA – Publishers International Linking Association).
Всем статьям, публикуемым в журнале, присваиваются индексы DOI (Digital Object Identifier).

В сведениях об авторах указываются данные, актуальные на момент предоставления рукописи в редакцию.

ТРУДЫ ВИАМ

TRUDY VIAM

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

СОДЕРЖАНИЕ

Жаропрочные сплавы и стали

Севальнев Г.С., Нефедкин Д.Ю., Дульнев К.В., Скоринова М.А. Исследование характеристик мартенситостареющей стали при триботехническом нагружении

Мин П.Г., Вадеев В.Е., Колесников С.И., Чемов Д.А. Влияние примесей на механические и эксплуатационные свойства литейного жаропрочного никелевого сплава ВЖМ200

Легкие сплавы

Шпагин А.С., Баженов А.Р., Антипов К.В., Оглодкова Ю.С. Построение реологической модели деформируемого алюминиевого сплава 1163 для компьютерного моделирования процессов обработки металлов давлением

Кашапов О.С., Рыжков П.В., Чучман О.В., Наприенко С.А. Исследование сопротивления усталости материала листов из титанового сплава VT41 при комнатной температуре в условиях одноосного растяжения в мало- и многоциклового области

Полимерные материалы

Гуров Д.А., Цапенко А.Н., Павлюкович Н.Г. Эффект взаимного упрочнения в полимерных композитах на основе полиэфирэфиркетона и термотропных жидкокристаллических полимеров, полученных методом 3D-печати

Композиционные материалы

Колпачков Е.Д., Вавилова М.И., Серкова Е.А., Долгов Э.Ю., Антипов В.В. ПКМ нового поколения на основе стеклянных наполнителей для изготовления элементов интерьера вертолетной техники

CONTENTS

Heat-resistant alloys and steels

Sevalnev G.S., Nefedkin D.Yu., Dulnev K.V., Skorikova M.A. Study of the characteristics of maraging steel under tribotechnical loading

Min P.G., Vadeev V.E., Kolesnikov S.I., Chernov D.A. The effect of impurities on mechanical and operational properties of the cast nickel-base superalloy VZhM200

Light-metal alloys

Shpagin A.S., Bazhenov A.R., Antipov K.V., Oglochkova Yu.S. Construction of a rheological model of deformable aluminum alloy 1163 for computer simulation of metal pressure processes

Kashapov O.S., Ryzhkov P.V., Chuchman O.V., Naprienko S.A. Investigation of the fatigue strength of VT41 titanium alloy sheet material at room temperature under uniaxial stretching conditions in the low- and high-cycle region

Polymer materials

Gurov D.A., Tsapenko A.N., Pavlukovich N.G. Effect of mutual strengthening in polymer composites based on polyetheretherketone and thermotropic liquid crystal polymers obtained by 3D-printing

Composite materials

Kolpachkov E.D., Vavilova M.I., Serkova E.A., Dolgov E.Yu., Antipov V.V. New generation PCM based on glass fillers for the manufacturing of interior elements of helicopter equipment

**Защитные и функциональные
покрытия**

**Антипов В.В., Венедиктова М.А., Пуш-
ница А.С., Котельникова Д.Д., Попов А.В.**
Исследование возможности расширения
температурного интервала эксплуатации
огнезащитных материалов

Марченко С.А., Скирко П.В. Влияние тем-
пературы на время высыхания и жизнеспо-
собность шпатлевки на основе эпоксивинил-
эфирной смолы

Испытания материалов

**Старцев О.В., Коваль Т.В., Кротов А.С.,
Двирная Е.В., Велигодский И.М.** Иссле-
дование свойств углепластика с покрытия-
ми после 8 и 13 лет старения в умеренно
теплом климате. Часть 1. Влагосодержание
и коэффициенты диффузии влаги

**Protective and functional
coatings**

74 **Antipov V.V., Venediktova M.A., Push-
nitsa A.S., Kotelnikova D.D., Popov A.V.**
Investigation of the possibility of increasing the
temperature range of fire retardant materials

84 **Marchenko S.A., Skivko P.V.** Effect of tem-
perature on drying time and viability of
epoxyvinyl ether resin putty

Material tests

94 **Startsev O.V., Koval T.V., Krotov A.S.,
Dvirnaya E.V., Veligodsky I.M.** Investigation
of the properties of carbon fiber reinforced
plastic with coatings after 8 and 13 years of
weathering in moderately warm climate.
Part 1. Moisture content and diffusion coeffi-
cients

Научная статья

УДК 669.14:669.15-194.55

DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-10-3-12

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МАРТЕНСИТОСТАРЕЮЩЕЙ СТАЛИ ПРИ ТРИБОТЕХНИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

Г.С. Севальнев¹, Д.Ю. Нефедкин¹, К.В. Дульнев¹, М.А. Скорикова¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. Проведены металлографические и дюрOMETрические исследования, а также испытания на изнашивание в условиях сухого трения скольжения мартенситостареющей стали 21НКМТ после различных видов термической обработки. Установлено, что наименьшей интенсивностью изнашивания обладают образцы после закалки и однократного старения, при этом наибольшей твердостью 630 HV обладают образцы после двукратного старения. Применение двукратного старения и перестаривания стали 21НКМТ приводит к увеличению интенсивности изнашивания на 12–33 %.

Ключевые слова: мартенситостареющие стали, твердость, износостойкость, размер зерна, старение, коэффициент трения, интерметаллиды

Для цитирования: Севальнев Г.С., Нефедкин Д.Ю., Дульнев К.В., Скорикова М.А. Исследование характеристик мартенситостареющей стали при триботехническом нагружении // Труды ВИАМ. 2024. № 10 (140). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-10-3-12.

Scientific article

STUDY OF THE CHARACTERISTICS OF MARAGING STEEL UNDER TRIBOTECHNICAL LOADING

G.S. Sevalnev¹, D.Yu. Nefedkin¹, K.V. Dulnev¹, M.A. Skorikova¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. Metallographic and durometric studies and wear tests under dry sliding friction conditions of maraging steel 21NKMT after various types of heat treatment were carried out. It has been established that the samples after quenching and single aging have the lowest wear rate, while the samples after two-times aging have the highest hardness of 630 HV. The use of two-fold aging and overaging of 21NKMT steel leads to an increase in wear intensity by 12–33%.

Keywords: maraging steels, hardness, wear resistance, grain size, aging, friction coefficient, precipitation particles, intermetallics

For citation: Sevalnev G.S., Nefedkin D.Yu., Dulnev K.V., Skorikova M.A. Study of the characteristics of maraging steel under tribotechnical loading. *Trudy VIAM*, 2024, no. 10 (140), paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-10-3-12.

Введение

Для эффективной работы тяжело нагруженных элементов подвижных механизмов в условиях экстремальных нагрузок (контактная деформация, совмещенная с температурным воздействием) требуются материалы с высокими механическими и триботехническими характеристиками [1–5]. Для обеспечения конкурентоспособности готового изделия немаловажное значение должна иметь стоимость материала, однако не всегда этот параметр обеспечивается при конечной реализации.

Одними из наиболее подходящих материалов для обеспечения требований к тяжело нагруженным деталям являются сплавы на основе железа, сочетающие высокий комплекс характеристик, а также достаточно низкую стоимость [6–11].

Специализированные агрегаты могут применяться в качестве подвижных механизмов сложнопрофильных или тонкостенных изделий, ввиду чего для снижения коробления при термической обработке, а также для упрощения их изготовления необходимо использовать стареющие сплавы.

Один из показателей, по которому можно оценивать износостойкость материала, – твердость. При этом износостойкость является структурно-зависимой характеристикой и не всегда увеличение твердости приводит к снижению интенсивности изнашивания [12, 13].

Высокую твердость и износостойкость могут обеспечивать стареющие сплавы за счет формирования мелкодисперсных упрочняющих фаз в процессе старения. Стареющими сплавами на основе железа являются стали, относящиеся к мартенситостареющему и аустенитно-ферритному классам [14–18]. Однако для аустенитно-ферритного класса высокие значения твердости достигаются путем формирования в структуре охрупчивающей σ -фазы, которая в большинстве случаев приводит к негативному влиянию на показатель износостойкости. Мартенситостареющие стали системы Fe–Ni–Co–Mo–Ti лишены данного недостатка, однако обладают высокой стоимостью из-за дорогостоящих легирующих элементов. Благодаря мелкозернистой структуре, которая формируется при горячей обработке давлением и термической обработке, и выделению интерметаллидов $Me_3(Ti, Mo)$, $MeTi$, фаз Лавеса (Fe_2Mo) в структуре стали при старении никель-кобальтового мартенсита замещения твердость может достигать 58 HRC по шкале Роквелла [19–23].

Главными достоинствами мартенситостареющих сталей при высоком уровне прочностных и пластических характеристик являются сквозная прокаливаемость, отсутствие фазовых превращений при деформационном нагружении ввиду отсутствия метастабильной аустенитной структуры, а также возможность реализации эливарных свойств после полного цикла термической обработки.

В связи с вышеперечисленными достоинствами мартенситостареющих сталей данный класс материалов может использоваться для изготовления специальных пар трибосопряжения. Цель данной работы – исследование триботехнических характеристик мартенсито-стареющей стали 21HKMT в зависимости от вида термической обработки для оценки возможности применения данного класса материалов в парах трения.

Материалы и методы

В качестве объектов исследования использовали образцы из мартенситостареющей стали 21HKMT [24] системы Fe–Ni–Co–Mo–Ti, вырезанные из горячекатаного полуфабриката, полученного методом радиально-сдвиговой прокатки. Образцы представляли собой диски $\varnothing 30 \times 7$ мм. Исследования проводили на образцах после горячей пластической деформации, закалки с температуры $A_{c3} + 100$ °C и закалки, совмещенной со старением. Старение образцов проводили по типовым режимам для мартенситостареющих сталей в интервале температур 450–550 °C по следующим режимам:

- однократное старение для достижения высокой твердости;
- двукратное старение с достариванием на второй ступени;

– перестаривание с целью незначительного снижения твердости и оценки структурной зависимости триботехнических характеристик.

Металлографический анализ структур стали 21НКМТ после упрочняющей термической обработки проводили на оптическом инвертированном микроскопе при увеличении $\times 1000$. Твердость HV_1 определяли по методу Виккерса с помощью твердомера при нагрузке 1 кг (10 Н) в соответствии с ГОСТ 2999–75. Твердость HRC определяли по методу Роквелла с помощью твердомера при нагрузке 150 кг (1500 Н) в соответствии с ГОСТ 9013–59.

Исследования триботехнических характеристик проводили в условиях сухого трения скольжения по схеме «шарик–диск» при линейной скорости перемещения образца относительно контртела $\sim 0,18$ м/с и нагрузке 10 Н с использованием трибометра. Контртелом являлся шарик диаметром 6 мм из хромистой стали ШХ15-ШД (аналог – сталь AISI 52100) твердостью 64 HRC. Для определения среднего значения и амплитуды колебаний коэффициента трения использовали график кинетики изменения коэффициента сухого трения скольжения при фрикционном взаимодействии образца и контртела. Интенсивность изнашивания W ($\text{мм}^3/(\text{Н}\cdot\text{м})$) рассчитывали по формуле [13]

$$W = \frac{ls}{PL},$$

где l – длина окружности, мм; s – площадь поперечного сечения дорожки износа, мм^2 ; P – нагрузка, Н; L – путь трения, м.

Износ объема поверхности контртела $\Delta V_{\text{шар}}$ рассчитывали по формуле

$$\Delta V_{\text{шар}} = \pi \cdot h^2 \left(r - \frac{1}{3} h \right),$$

где $h = r - \left(r^2 - \left[\frac{d}{2} \right]^2 \right)^{\frac{1}{2}}$, d – диаметр пятна износа, мм; r – радиус шарика, мм; h – толщина изношенного сегмента, мм.

Интенсивность изнашивания контртела $W_{\text{контр}}$ рассчитывали по формуле, аналогичной формуле для образца:

$$W_{\text{контр}} = \frac{\Delta V_{\text{шар}}}{PL}.$$

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Результаты и обсуждение

Все исследуемые образцы изготовлены из прутка после радиально-сдвиговой прокатки в горячем состоянии с температуры аустенизации. Структура прутка после радиально-сдвиговой прокатки состоит из мелкозернистой структуры (рис. 1, а). Средний размер зерна при такой структуре составляет ~ 34 мкм.

Применение последующей закалки привело к укрупнению зеренной структуры и увеличению среднего размера зерна до 72 мкм (рис. 1, б). ДюрOMETрический анализ образцов показал, что увеличение зеренной структуры после закалки также способствовало снижению твердости на 12 % – с 344 ± 6 до 308 ± 8 HV.

Такое резкое укрупнение зерна может быть связано с рядом факторов:

- во время термической обработки в результате длительной выдержки при температуре закалки частично произошла собирательная рекристаллизация;
- вырезка образца произведена из сегмента прутка с изначально крупным зерном с последующим его ростом при термической обработке.

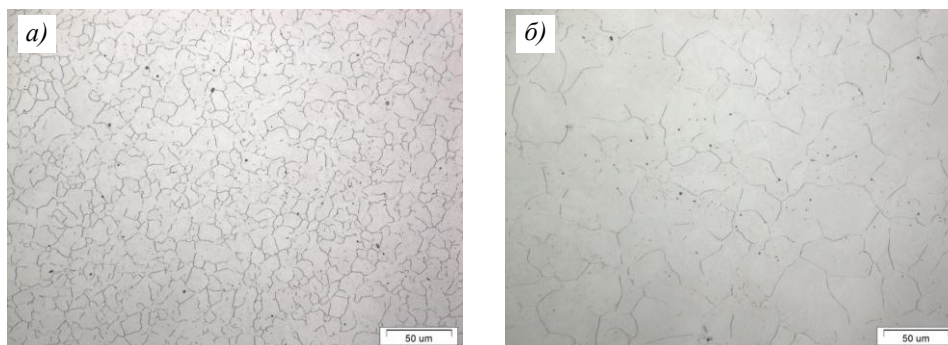


Рис. 1. Микроструктуры ($\times 500$) образцов из мартенситостареющей стали 21HKMT после радиально-сдвиговой прокатки (а) и последующей закалки (б)

Обеспечение высокой твердости у мартенситостареющих сталей реализуется за счет старения, в связи с чем проведены термическая обработка с классическим старением для сталей системы Fe–Ni–Co–Mo–Ti, достаривание путем двукратного старения для получения более высоких значений твердости и перестаривание для оценки влияния снижения твердости на интенсивность изнашивания. Результаты исследования структуры с применением оптической микроскопии представлены на рис. 2. Сформированная мелкозернистая мартенситная структура также подтверждает, что образец после закалки вырезан с изначально крупной структурой. Однако в рамках данных исследований это не оказывает существенного влияния на определяемые характеристики.



Рис. 2. Микроструктуры ($\times 500$) образцов из мартенситостареющей стали 21HKMT после однократного старения (а), двукратного старения (б) и перестаривания (в)

Анализ изменения твердости образцов после радиально-сдвиговой прокатки, закалки и в зависимости от режима старения показал, что максимальная твердость 630 ± 10 HV формируется при двукратном старении (рис. 3). Применение для данной стали классической обработки с однократным старением для достижения высокого комплекса механических характеристик обеспечило формирование твердости на 5 % меньше по сравнению с двукратным старением (595 ± 4 HV), а перестаривание сопровождается коагуляцией упрочняющих фаз и реализацией ($\alpha \rightarrow \gamma$)-превращения, что приводит к снижению твердости на 10 % по сравнению с однократным старением и на 15 % по сравнению с двукратным старением (545 ± 6 HV).

Для оценки износостойкости образцов из мартенситостареющей стали 21HKMT проведены испытания на изнашивание в условиях сухого трения скольжения. Анализ кинетики изменения коэффициента сухого трения скольжения при испытании позволил установить, что однофазная структура как в случае радиально-сдвиговой прокатки (1), так и в случае закалки (2) формирует достаточно стабильный коэффициент трения пары трибосопряжения (рис. 4, а). Применение старения для выделения интерметаллидов также реализует достаточно стабильный коэффициент трения, однако

процесс перестаривания приводит к его дестабилизации (рис. 4, б). Предположительно это связано с протеканием ($\alpha \rightarrow \gamma$)-превращения, коагуляцией упрочняющих фаз и разупрочнением. Анализ среднего значения коэффициента трения, а также амплитуды колебания коэффициента трения также показывает, что при всех режимах, кроме перестаривания, все значения приблизительно равны, а перестаривание приводит к увеличению среднего коэффициента трения на 10 % и амплитуды колебаний – на 70 % (рис. 5).

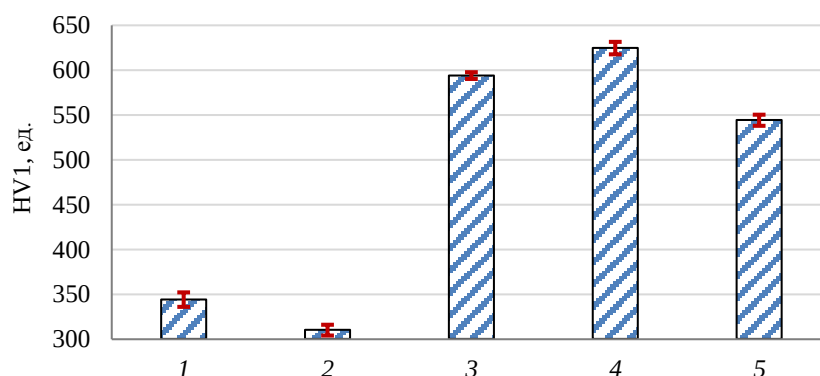


Рис. 3. Твердость образцов из мартенситостареющей стали 21НКМТ после радиально-сдвиговой прокатки (1), закалки (2), однократного старения (3), двукратного старения (4) и перестаривания (5)

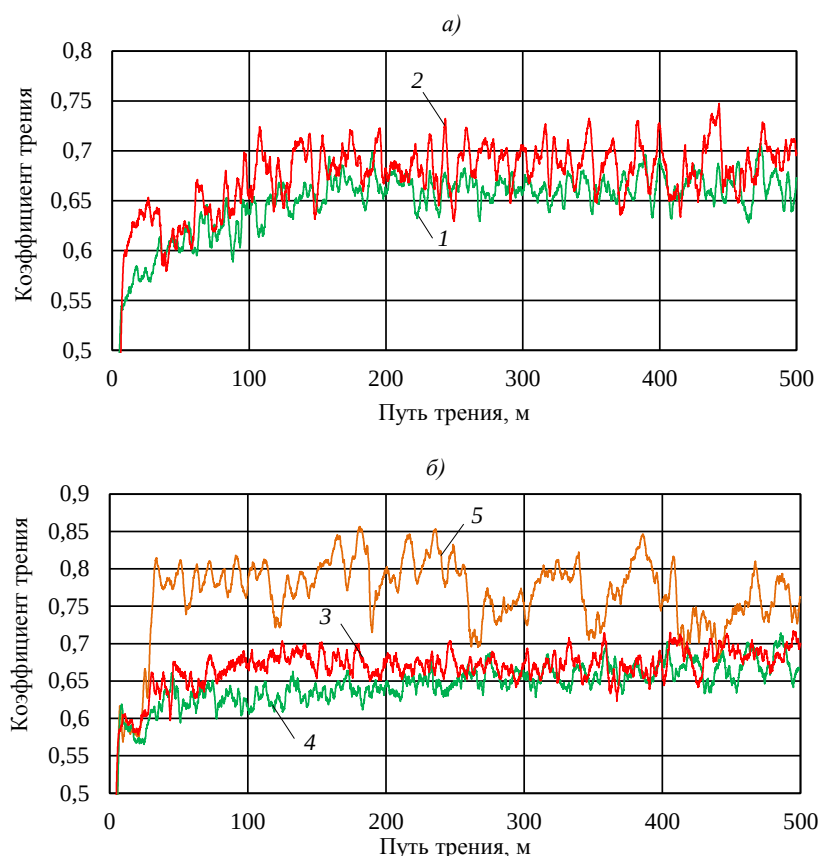


Рис. 4. Кинетика изменения коэффициента сухого трения скольжения контртела из стали ШХ15-ШД после упрочняющей обработки в паре трения со сталью 21НКМТ после радиально-сдвиговой прокатки (1), закалки (2), однократного старения (3), двукратного старения (4) и перестаривания (5)

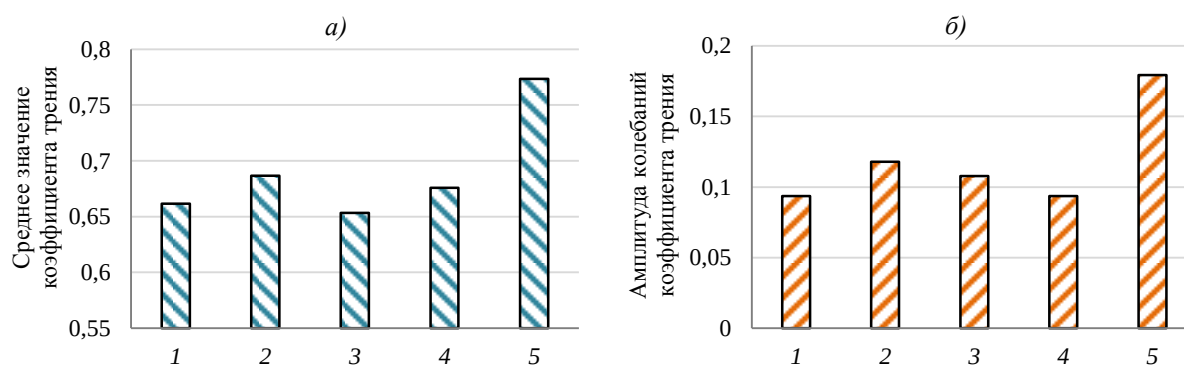


Рис. 5. Среднее значение коэффициента сухого трения скольжения (а) и амплитуды колебания коэффициента трения (б) контртела из стали ШХ15-ШД после упрочняющей обработки в паре трения со сталью 21НКМТ после радиально-сдвиговой прокатки (1), закалки (2), однократного старения (3), двукратного старения (4) и перестаривания (5)

Анализ интенсивности изнашивания в условиях сухого трения скольжения образцов и контртела после испытаний позволил установить, что наименьшим показателем обладает образец, претерпевший однократное старение (рис. 6). Радиально-сдвиговая прокатка обладает интенсивностью изнашивания на 20 % меньше ($1,41 \cdot 10^{-4} \text{ мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$), чем образцы после закалки ($1,72 \cdot 10^{-4} \text{ мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$), что, по-видимому, связано с меньшим размером зерна и увеличенной плотностью дефектов по сравнению с закаленным образцом. Старение после закалки привело к снижению интенсивности изнашивания на 85 % ($9,2 \cdot 10^{-5} \text{ мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$), двукратное старение – на 39 % ($1,24 \cdot 10^{-4} \text{ мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$), перестаривание – на 65 % ($1,04 \cdot 10^{-4} \text{ мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$). Относительно однократного старения интенсивность изнашивания после двукратного старения и перестаривания увеличивает интенсивность изнашивания на 12–33 %. Несмотря на то что при двукратном старении достигается наибольшее повышение твердости, уменьшение интенсивности изнашивания среди упрочняющих обработок является наименьшим. По-видимому, это связано с чрезмерным упрочнением интерметаллидными фазами мартенситной матрицы, в результате чего происходит процесс микровыкрашивания поверхности, что также указывает на более высокую интенсивность изнашивания контртела по сравнению с другими процессами упрочнения.

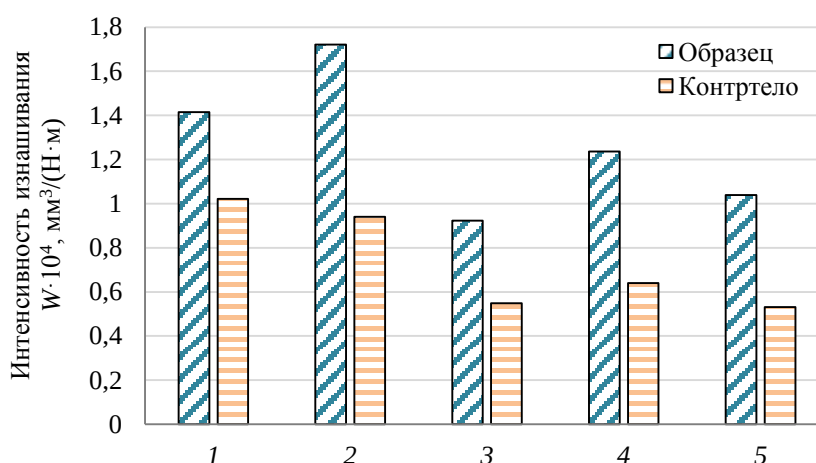


Рис. 6. Интенсивность изнашивания контртела из стали ШХ15-ШД после упрочняющей обработки в паре трения со сталью 21НКМТ после радиально-сдвиговой прокатки (1), закалки (2), однократного старения (3), двукратного старения (4) и перестаривания (5)

При проведении сравнительного анализа интенсивности изнашивания относительно других марок сталей [13] – например, мартенситного и аустенитно-мартенситного классов – мартенситостареющая сталь марки 21НКМТ после закалки и однократного старения обладает меньшей интенсивностью изнашивания в 1,9–2,3 раза по сравнению со сталями ВНС30-Ш и ВНС72-Ш с твердостью 520–540 HV. В данном случае обеспечение меньшей интенсивности изнашивания реализуется за счет значительного растворения легирующих элементов в матрице и дальнейшего выделения мелкодисперсных упрочняющих интерметаллидных фаз, которые могут вносить значительный вклад в сопротивление контактно-деформационным нагрузкам. В случае сталей ВНС30-Ш и ВНС72-Ш упрочнение происходит за счет образования пересыщенного элементами внедрения и легирующими элементами мартенсита закалки, который является более напряженным и может претерпевать более интенсивное изнашивание при фрикционном взаимодействии.

В работах [13, 25–27] показано, что износостойкость как для сталей различных классов, так и для механизмов упрочнения является структурно-зависимой характеристикой и не полностью зависит от формируемой твердости образцов. Если рассматривать возможность применения мартенситостареющих сталей в тяжело нагруженных парах трения, то формируемая интенсивность изнашивания ниже, чем у сталей аустенитного класса, но выше, чем у сталей перлитного, аустенитно-мартенситного и мартенситного классов. Из-за высокой стоимости материала нецелесообразно использовать его в трибосопряжении для простых изделий, однако в случае изготовления крупногабаритной детали, в которой необходимо обеспечить высокий уровень прочностных и триботехнических характеристик пары трения с учетом высокой технологичности материала при изготовлении изделия, мартенситостареющие стали становятся незаменимым материалом.

Заключения

Разработка современных тяжело нагруженных агрегатов с целью улучшения технических характеристик конечных изделий сопровождается необходимостью использования более высокопрочных и технологичных материалов.

Для деталей и сложнопрофильных пар трибосопряжения, работающих в экстремальных условиях интенсивного изнашивания, требуется применение технологичных материалов с высокой износостойкостью. Высоким уровнем прочностных и пластических характеристик, сквозной прокаливаемостью, а также высокой технологичностью при изготовлении конечного изделия обладают мартенситостареющие стали, основным недостатком которых является высокая стоимость в связи с содержанием дорогостоящих легирующих элементов, таких как никель, кобальт и титан. После полного цикла термической обработки мартенситостареющие стали обладают достаточно высокой твердостью – не менее 52 HRC (>550 HV).

Для оценки возможности применения мартенситостареющих сталей в составе пары трибосопряжения исследованы образцы после горячей деформации и термической обработки. С помощью металлографического анализа образцов установлено, что закалка после горячей радиально-сдвиговой прокатки приводит к увеличению среднего размера зерна с 34 до 72 мкм. Структура при последующем старении включает мартенсит замещения и интерметаллидные упрочняющие фазы. Максимальной твердостью 630 ± 10 HV обладают образцы после двукратного старения, однократное старение формирует твердость 595 ± 4 HV, перестаривание: 545 ± 6 HV.

Для оценки износостойкости образцов из мартенситостареющей стали 21НКМТ проведены испытания на изнашивание в условиях сухого трения скольжения. По результатам испытаний установлено, что, несмотря на высокий показатель твердости, образцы после двукратного старения обладают интенсивностью изнашивания на 39 % меньше по сравнению с закаленными образцами с твердостью 308 ± 8 HV. Наименьшая интенсивность

изнашивания у образцов после однократного старения: $9,2 \cdot 10^{-5} \text{ мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$. Перестаривание мартенситной структуры приводит к снижению твердости на 15 %, в результате чего увеличивается интенсивность изнашивания образцов из мартенситостареющей стали 21НКТ.

Сравнительный анализ интенсивности изнашивания с коррозионностойкими сталями марок ВНС30-Ш и ВНС72-Ш показал, что формирование мартенситной структуры, упрочненной интерметаллидными фазами, обеспечивает интенсивность изнашивания в 1,9–2,3 раза меньше по сравнению с более напряженным мартенситом, пересыщенным легирующими элементами внедрения.

Список источников

1. Коробова Е.Н., Севальнев Г.С., Громов В.И., Леонов А.В. Стали для изготовления подшипников качения специального назначения (обзор) // Труды ВИАМ. 2021. № 11 (105). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 05.02.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-11-3-11.
2. Gloeckner P., Rodway C. The evolution of reliability and efficiency of aerospace bearing systems // Engineering. 2017. Vol. 9. No. 11. P. 962–991.
3. Krishna S.C., Tharian K.T., Chakravarthi K.V. A. et al. Heat treatment and thermo-mechanical treatment to modify carbide banding in AISI 440C steel: a case study // Metallography, Microstructure, and Analysis. 2016. Vol. 5. No. 2. P. 108–115.
4. Геллер Ю.А. Инструментальные стали. М.: Металлургия, 1983. 525 с.
5. Севальнев Г.С. Бериллийсодержащие стали – перспективный материал с высоким уровнем физико-механических свойств // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 3 (72). Ст. 02. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 24.01.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-15-29.
6. Бакрадзе М.М., Вознесенская Н.М., Леонов А.В., Крылов С.А., Тонышева О.А. Разработка и исследование высокопрочной коррозионностойкой стали для деталей подшипников // Металлург. 2019. № 11. С. 39–44.
7. Каблов Е.Н., Бакрадзе М.М., Громов В.И., Вознесенская Н.М., Якушева Н.А. Новые высокопрочные конструкционные и коррозионностойкие стали для аэрокосмической техники разработки ФГУП «ВИАМ» (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 1 (58). С. 3–11. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-3-11.
8. Баннских И.О., Ашмарин А.А., Бецофен С.Я. и др. Оптимизация химического состава и параметров термомеханической обработки трип сталей на основе новых методов рентгеновской тензометрии, текстурного и фазового анализов // Металлы. 2022. № 6. С. 66–72.
9. Lukin E.I., Blinov V.M., Bannykh I.O. et al. Effect of the Quenching Temperature on the Structure and Mechanical Properties of Martensitic–Ferritic Corrosion-Resistant Nitrogen-Bearing 08Kh17N2AF Steel // Russian Metallurgy (Metally). 2023. No. 6. P. 629–637.
10. Blinov V.M., Antsyferova M.V., Bannykh I.O. et al. Structure and Properties of High-Strength Low-Alloy Martensitic Steels with an Overequilibrium Nitrogen Content // Russian Metallurgy (Metally). 2023. No. 6. P. 649–656.
11. Lukin E.I., Ashmarin A.A., Bannykh I.O. et al. Effect of the Reduction during Cold Rolling on the Phase Composition, Texture, and Residual Stresses in 20Kh15AN3MD2 Steel // Russian Metallurgy (Metally). 2023. Vol. 2023. No. 11. P. 1598–1605.
12. Куксенова Л.И., Герасимов С.А., Лаптева В.Г. Износостойкость конструкционных материалов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. 240 с.
13. Севальнев Г.С., Севальнева Т.Г., Колмаков А.Г., Дульнев К.В., Крылов С.А. Исследование триботехнических характеристик коррозионностойких сталей с различным механизмом объемного упрочнения // Труды ВИАМ. 2021. № 10 (104). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 16.02.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-10-3-11.
14. Покровская Н.Г., Маркова Е.С., Шалькевич А.Б. Высокопрочные конструкционные мартенситостареющие стали в авиастроении // Авиационная промышленность. 2014. № 1. С. 24–28.
15. Стивен У. Мартенситностареющие стали // Высокопрочные стали: сб. статей. М.: Металлургия, 1969. С. 235–257.
16. Еднерал А.Ф., Кардонский В.М., Перкас М.Д. Структурные изменения при старении безуглеродистого железоникелевого мартенсита // Несовершенства кристаллического строения и мартенситные превращения: сб. статей. М.: Наука, 1972. С. 63–79.

17. Перкас М.Д., Кардонский В.М. Высокопрочные мартенситностареющие стали. М.: Металлургия, 1970. 223с.
18. Севальнев Г.С., Дружинина М.Э., Дульнев К.В., Мосолов А.Н., Фомина Л.П., Чирков И.А. Повышение триботехнических характеристик бериллийсодержащей стали ВНС32-ВИ путем модификации поверхности // Труды ВИАМ. 2022. № 11 (117). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 05.01.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-11-3-14.
19. Горохов А.Ю. Влияние структуры стали ВКС-210 на дефект модуля упругости при усталостном воздействии // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2015. № 3-1. С. 52–54.
20. Перкас М.Д., Струг М.Д., Русаненко В.В. Эливарные мартенситостареющие стали с высоким пределом упругости // Металловедение и термическая обработка металлов. 1991. № 8. С. 40–41.
21. Маркова Е.С., Якушева Н.А., Покровская Н.Г., Шалькевич А.Б. Технологические особенности производства мартенситостареющей стали ВКС-180 // Труды ВИАМ. 2013. № 7. Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 10.02.2024).
22. Конструкционные материалы: справочник / под общ. ред. Б.Н. Арзамасова. М.: Машиностроение, 1990. 688 с.
23. Садовский В.Д. Структурная наследственность в стали. М.: Металлургия, 1973. 208 с.
24. Ошурина Л.А. Анализ применения датчиков параметров на основе эливарного сплава 21НКТ // Инновации и инвестиции. 2021. № 3. С. 169–171.
25. García-León R.A., Martínez-Trinidad J., Campos-Silva I. et al. Wear maps of borided AISI 316L steel under ball-on-flat dry sliding conditions // Materials Letters. 2021. Vol. 282. P. 128842.
26. Kuksenova L.I., Alekseeva M.S. Effect of Preliminary Treatment on Tribotechnical Characteristics of Nitrided Structural Steels // Metal Science and Heat Treatment. 2023. Vol. 65. No. 1-2. P. 34–41.
27. Kuksenova L.I., Savenko V.I. Physicochemical Tribomechanics of Antifriction Materials Operating in Heavy-Loaded Friction Pairs in Active Lubricating Media // Journal of Friction and Wear. 2023. Vol. 44. No. 6. P. 333–345.

References

1. Korobova E.N., Sevalnev G.S., Gromov V.I., Leonov A.V. Steels for the manufacture of roller bearings for special purposes (review). *Trudy VIAM*, 2021, no. 11 (105), paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: February 05, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-11-3-11.
2. Gloeckner P., Rodway C. The evolution of reliability and efficiency of aerospace bearing systems. *Engineering*, 2017, vol. 9, no. 11, pp. 962–991.
3. Krishna S.C., Tharian K.T., Chakravarthi K.V.A. et al. Heat treatment and thermo-mechanical treatment to modify carbide banding in AISI 440C steel: a case study. *Metallography, Microstructure, and Analysis*, 2016, vol. 5, no. 2, pp. 108–115.
4. Geller Yu.A. *Tool steels*. Moscow: Metallurgiya, 1983, 525 p.
5. Sevalnev G.S. Beryllium-containing steels – perspective material with a high level of physical and mechanical properties. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 3 (72), paper no. 02. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: January 24, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-15-29.
6. Bakradze M.M., Voznesenskaya N.M., Leonov A.V., Krylov S.A., Tonysheva O.A. Development and research of high-strength corrosion-resistant steel for bearing parts. *Metallurg*, 2019, no. 11, pp. 39–44.
7. Kablov E.N., Bakradze M.M., Gromov V.I., Voznesenskaya N.M., Yakusheva N.A. New high strength structural and corrosion-resistant steels for aerospace equipment developed by FSUE «VIAM» (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 1 (58), pp. 3–11. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-3-11.
8. Bannykh I.O., Ashmarin A.A., Betzofen S.Ya. et al. Optimization of chemical composition and parameters of thermomechanical processing of TRIP steels based on new methods of X-ray tensiometry, texture and phase analysis. *Metally*, 2022, no. 6, pp. 66–72.
9. Lukin E.I., Blinov V.M., Bannykh I.O. et al. Effect of the Quenching Temperature on the Structure and Mechanical Properties of Martensitic–Ferritic Corrosion-Resistant Nitrogen-Bearing 08Kh17N2AF Steel. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2023, no. 6, pp. 629–637.
10. Blinov V.M., Antsyferova M.V., Bannykh I.O. et al. Structure and Properties of High-Strength Low-Alloy Martensitic Steels with an Overequilibrium Nitrogen Content. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2023, no. 6, pp. 649–656.

11. Lukin E.I., Ashmarin A.A., Bannykh I.O. et al. Effect of the Reduction during Cold Rolling on the Phase Composition, Texture, and Residual Stresses in 20Kh15AN3MD2 Steel. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2023, vol. 2023, no. 11, pp. 1598–1605.
12. Kuksenova L.I., Gerasimov S.A., Lapteva V.G. *Wear resistance of structural materials*. Moscow: Publ. house of Bauman Moscow State Technical Univ., 2011, 240 p.
13. Sevalnev G.S., Sevalneva T.G., Kolmakov A.G., Dulnev K.V., Krylov S.A. Study of the tribotechnical characteristics of corrosion-resistant steels with different mechanisms of volumetric hardening. *Trudy VIAM*, 2021, no. 10 (104), paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: February 16, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-10-3-11.
14. Pokrovskaya N.G., Markova E.S., Shalkevich A.B. High-strength structural martensitic aging steels in aircraft construction. *Aviatsionnaya promyshlennost*, 2014, no. 1, pp. 24–28.
15. Stephen W. Martensitic aging steels. *High-strength steels*. Moscow: Metallurgiya, 1969, pp. 235–257.
16. Edneral A.F., Kardonsky V.M., Perkas M.D. Structural changes during aging of carbon-free iron-nickel martensite. *Imperfections of the crystal structure and martensitic transformations*. Moscow: Nauka, 1972, pp. 63–79.
17. Perkas M.D., Kardonsky V.M. *High-strength maraging steels*. Moscow: Metallurgy, 1970, 223 p.
18. Sevalnev G.S., Druzhinina M.E., Dulnev K.V., Mosolov A.N., Fomina L.P., Chirkov I.A. Improvement of the tribotechnical characteristics of beryllium-containing steel VNS32-VI by surface modification. *Trudy VIAM*, 2022, no. 11 (117), paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: January 05, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-11-3-14.
19. Gorokhov A.Yu. Effect of VKS-210 steel structure on the defect of elastic modulus under fatigue impact. *Aktualnye problemy gumanitarnykh i yestestvennykh nauk*, 2015, no. 3-1, pp. 52–54.
20. Perkas M.D., Strug M.D., Rusanenko V.V. Elinvar martensitic-aging steels with a high elastic limit. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 1991, no. 8, pp. 40–41.
21. Markova E.S., Yakusheva N.A., Pokrovskaya N.G., Shalkevich A.B. Technological features of the production of maraging steel VKS-180. *Trudy VIAM*, 2013, no. 7, paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: February 10, 2024).
22. *Structural materials: reference book*. Ed. B.N. Arzamasov. Moscow: Mashinostroenie, 1990, 688 p.
23. Sadovsky V. D. *Structural heredity in steel*. Moscow: Metallurgiya, 1973, 208 p.
24. Oshurina L.A. Analysis of the application of parameter sensors based on 21NKMT elinvar alloy. *Innovatsii i investitsii*, 2021, no. 3, pp. 169–171.
25. García-León R.A., Martínez-Trinidad J., Campos-Silva I. et al. Wear maps of borided AISI 316L steel under ball-on-flat dry sliding conditions. *Materials Letters*, 2021, vol. 282, p. 128842.
26. Kuksenova L.I., Alekseeva M.S. Effect of Preliminary Treatment on Tribotechnical Characteristics of Nitrided Structural Steels. *Metal Science and Heat Treatment*, 2023, vol. 65, no. 1-2, pp. 34–41.
27. Kuksenova L.I., Savenko V.I. Physicochemical Tribomechanics of Antifriction Materials Operating in Heavy-Loaded Friction Pairs in Active Lubricating Media. *Journal of Friction and Wear*, 2023, vol. 44, no. 6, pp. 333–345.

Информация об авторах

Севальнев Герман Сергеевич, начальник сектора, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Нефедкин Данила Юрьевич, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Дульнев Константин Владимирович, инженер 2 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Скорикова Марина Алексеевна, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

German S. Sevalnev, Head of Sector, Candidate of Science (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Danila Yu. Nefedkin, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Konstantin V. Dulnev, Second Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Marina A. Skorikova, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 18.07.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 31.07.2024.
The article was submitted 18.07.2024; approved and accepted for publication after reviewing 31.07.2024.

Научная статья

УДК 669.018.44:669.245

DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-10-13-23

ВЛИЯНИЕ ПРИМЕСЕЙ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ЛИТЕЙНОГО ЖАРОПРОЧНОГО НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА ВЖМ200

П.Г. Мин¹, В.Е. Вадеев¹, С.И. Колесников¹, Д.А. Чемов¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. Представлены результаты исследования влияния примесей серы, фосфора, кремния и азота на основные характеристики (длительную усталостную прочность и кратковременные механические свойства) жаропрочного никелевого сплава ВЖМ200 для литья рабочих лопаток с направленной структурой для газотурбинного двигателя ПД-8. Установлено, что при повышенном содержании данных примесей уменьшается время до разрушения сплава при температуре 1000 °С на базах 100 и 500 ч и снижается его пластичность при температуре 20 °С, а также число циклов до разрушения при испытании на МнЦУ при температуре 900 °С в сплаве с добавкой кремния и азота.

Ключевые слова: литейный жаропрочный никелевый сплав, направленная кристаллизация, примеси, механические свойства, длительная прочность, усталость

Для цитирования: Мин П.Г., Вадеев В.Е., Колесников С.И., Чемов Д.А. Влияние примесей на механические и эксплуатационные свойства литейного жаропрочного никелевого сплава ВЖМ200 // Труды ВИАМ. 2024. № 10 (140). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-10-13-23.

Scientific article

THE EFFECT OF IMPURITIES ON MECHANICAL AND OPERATIONAL PROPERTIES OF THE CAST NICKEL-BASE SUPERALLOY VZhM200

P.G. Min¹, V.E. Vadeev¹, S.I. Kolesnikov¹, D.A. Chemov¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. The results of the study of the effect of sulfur, phosphorus, silicon and nitrogen impurities on the main properties of the high-temperature nickel alloy VZhM200 for blades casting with a directional structure of the PD-8 gas turbine engine: long-term, fatigue strength and short-term mechanical properties are presented. It was found that with an increased content of these impurities in the alloy, the time to destruction decreases at $T = 1000$ °C at bases of 100, 500 h and plasticity at $T = 20$ °C. It was also found that the number of cycles to failure was reduced when tested for high-cycle fatigue at $T = 900$ °C in the alloy with the addition of silicon and nitrogen.

Keywords: cast heat-resistant nickel-base superalloy, directional crystallization, impurities, mechanical properties, long-term strength, fatigue

For citation: Min P.G., Vadeev V.E., Kolesnikov S.I., Chemov D.A. The effect of impurities on mechanical and operational properties of the cast nickel-base superalloy VZhM200. *Trudy VIAM*, 2024, no. 10 (140), paper no. 02. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-10-13-23.

Введение

Литейный жаропрочный никелевый сплав ВЖМ200 предназначен для изготовления ответственных и высоконагруженных деталей газотурбинных двигателей, таких как рабочие лопатки с направленной структурой, работоспособные до температуры 1000 °С. Данный сплав применяется в конструкции перспективного авиационного двигателя ПД-8 [1, 2] с тягой 8 тонн, созданного с целью импортозамещения французского двигателя SaM-146 для авиалайнера Sukhoi Super Jet NEW (SSJ-NEW) [3].

Для обеспечения высокой потребности в новых двигателях [4] в ПАО «ОДК-Сатурн» организовано современное производство турбинных лопаток, в том числе из сплава ВЖМ200. В процессе производства образуется значительное количество литейных кондиционных отходов, представляющих собой бракованные отливки, прибыльные части и металл из литниково-питающих систем. С ростом потребления сплава пропорционально увеличивается количество образующихся литейных отходов, содержащих дорогостоящие и дефицитные элементы – в первую очередь редкие металлы (например, содержание гафния в сплаве ВЖМ200 составляет 1,65 % (по массе)), возврат которых в производство рационален при использовании ограниченных природных ресурсов.

Кроме того, для повышения конкурентоспособности нового двигателя целесообразно снизить стоимость применяемого материала путем вовлечения в цикл производства максимального количества отходов, при этом необходимо обеспечить уровень качества продукции, соответствующий сплаву, изготовленному из первичных (свежих) шихтовых материалов. Эта задача осложняется наличием в литейных отходах повышенного содержания вредных примесей и газов: в прибыльных частях отливок концентрируются легкие неметаллические включения, а расплав загрязняется в результате взаимодействия с керамикой литейной формы [5]. Для сплава ВЖМ200 данный фактор имеет особое значение, поскольку входящий в его состав гафний является химически активным элементом и обладает высоким сродством к кислороду, а в процессе направленной кристаллизации расплав длительное время контактирует с керамикой литейной формы.

Поэтому для разработки технологии переработки отходов сплава ВЖМ200 целесообразно предварительно провести исследования по влиянию содержащихся в них примесей на механические и эксплуатационные свойства сплава. Подобные исследования ранее проводили на литейных жаропрочных никелевых сплавах с равноосной [6–13] и монокристаллической [13–18] структурами. Однако структура отливок из сплава ВЖМ200 представляет собой множество тонкостолбчатых однонаправленных зерен и является уникальной, так как в России не отливают детали с такой структурой из других отечественных жаропрочных никелевых сплавов. Для формирования данной макроструктуры применяют метод направленной кристаллизации с использованием поликристаллических затравок с заданной кристаллографической ориентацией <001> [19].

В представленной работе проведены исследования влияния наиболее вредных примесей для литейных жаропрочных никелевых сплавов (серы, фосфора, кремния и азота) на основные характеристики сплава ВЖМ200: длительную усталостную прочность и кратковременные механические свойства.

Материалы и методы

Объектом исследования являлся литейный жаропрочный никелевый сплав марки ВЖМ200. Определено содержание легирующих элементов и микродобавок в сплаве ВЖМ200, % (по массе) [20]:

Ni	C	Cr	Co	W	Al	Ti	Nb	Hf	B	Zr	La	Ce	Ca
Осно- ва	0,08– 0,14	8,0– 10,0	9,0– 11,0	11,5– 12,5	4,75– 5,25	1,75– 2,25	0,75– 1,25	1,5– 2,0	0,01– 0,02	≤0,05	≤0,05	≤0,05	≤0,005

Выплавку сплава проводили из свежих шихтовых материалов в промышленной вакуумной индукционной печи вместимостью тигля 350 кг. Для получения отливок с направленной структурой полученные литые прутковые заготовки после механической обработки переплавляли с заливкой в керамические блоки в плавильно-заливочной установке УВНК-9 [21–23] с применением поликристаллических затравок с кристаллографической ориентацией $\langle 001 \rangle$. При литье заготовок совместно с литой прутковой заготовкой дополнительно вводили навеску, содержащую примесные элементы: кремний – в чистом виде, фосфор и серу – в виде лигатур с железом, азот – в виде азотированного феррохрома.

Отливки подвергали термической обработке, включающей закалку (гомогенизацию) и старение в камерных электропечах сопротивления, после чего изготавливали образцы для испытаний механических свойств.

Содержание примеси серы в отливках определяли инфракрасным методом, азота – кондуктометрическим методом, примесей кремния и фосфора – масс-спектрометрическим методом с тлеющим разрядом [24].

На термически обработанных образцах проводили испытания механических свойств: на растяжение при температуре 20 °С, на длительную прочность при температурах 900 и 1000 °С, на многоцикловую усталость при температуре 900 °С на базе 10^7 циклов при коэффициенте асимметрии $R = -1$, на гадких образцах.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Результаты и обсуждение

Как показывает опыт, в жаропрочных никелевых сплавах, применяемых для литья отливок с направленной или монокристаллической структурой, особое внимание следует уделять примесям кремния, фосфора, серы и азота.

Так, кремний и фосфор переходят в расплав вследствие взаимодействия с материалом литейной формы, содержащей связующие на основе оксидов данных элементов. Эти примеси отрицательно влияют на основные характеристики литейных жаропрочных никелевых сплавов. Кремний увеличивает количество легкоплавкой фазы, способствует образованию карбидов неблагоприятной игольчатой формы [25], что приводит к снижению жаропрочности и пластичности. Кроме того, кремний способствует выделению из твердого раствора топологически плотноупакованных фаз [12] при длительной эксплуатации лопаток из литейных жаропрочных никелевых сплавов. Обогащенная фосфором фаза концентрируется в междендритных областях и является источником образования и распространения трещин. Это ускоряет процесс разрушения сплава при высоких температурах и снижает показатели прочности и пластичности [9, 26], а соединение NiP имеет низкую температуру плавления (850 °С), что отрицательно влияет на жаропрочность материала и ресурс лопаток, эксплуатируемых при температурах >900 °С.

Помимо данных элементов, для исследований выбрана сера как одна из наиболее вредных примесей, оказывающих отрицательное влияние на комплекс эксплуатационных свойств жаропрочных никелевых сплавов. Сера образует неметаллические включения в виде сульфидов, которые являются концентраторами напряжений, инициирующими зарождение трещин при эксплуатации лопаток. Она образует с никелем легкоплавкую эвтектику с температурой плавления 643 °С [10]. Кроме того, в ряде работ [17, 27, 28] отмечается отрицательное влияние серы на стойкость к высокотемпературному окислению и сульфидной коррозии защитных покрытий, наносимых на детали из жаропрочных никелевых сплавов. Сера поступает в сплав из первичных (свежих) шихтовых материалов, поскольку неизбежно присутствует в них как примесь. При переработке отходов литейных жаропрочных никелевых сплавов в виде деталей,

отработавших свой ресурс, следует учитывать вероятность дополнительного загрязнения их серой за счет насыщения продуктами сгорания топлива. Кроме того, источником загрязнения литейных отходов жаропрочных никелевых сплавов данной примесью являются смазывающие охлаждающие жидкости и масла, содержащие соединения серы. Данные вещества должны быть удалены с поверхности металла перед использованием его в производстве, однако существует риск неполного удаления таких загрязнений.

При литье фасонных отливок расплав неизбежно взаимодействует с остаточными газами (кислородом и азотом) в рабочей камере вакуумной печи, поэтому имеется вероятность насыщения отходов литейного производства данными примесями, особенно при многократном переплаве металла. Повышенное содержание газов также снижает свойства литейных жаропрочных сплавов. Известно, что с повышением содержания азота увеличивается микропористость в жаропрочных никелевых сплавах [29, 30]. Для сплавов с монокристаллической структурой азот – вредная примесь, в том числе потому, что при наличии сильных нитридообразователей, таких как титан, он способствует образованию карбонитридов, которые при кристаллизации, в свою очередь, способствуют зарождению «паразитных» зерен [14, 15].

На установке УВНК-9 проведена серия плавов сплава ВЖМ200 с добавками примесей кремния, фосфора, серы и азота. В плавку с условным номером 0 (далее – стандартная плавка) примеси не вводили. Содержание примесей в металле данной плавки составило, % (по массе): 0,021 кремния, 0,00065 фосфора, 0,00022 серы, 0,0007 азота. В плавки 1–3 вводили кремний. Остаточное содержание данной примеси составило соответственно 0,093; 0,166 и 0,243 % (по массе) при норме по ТУ: $\leq 0,2$ % (по массе). В плавки 4 и 5 вводили фосфор, в результате получено его остаточное содержание соответственно 0,0054 и 0,0141 % (по массе) при норме по ТУ: $\leq 0,015$ % (по массе). На плавках с введением серы (6–8) содержание данной примеси составило соответственно 0,0038; 0,0067 и 0,0130 % (по массе) при норме по ТУ: $\leq 0,01$ % (по массе). На плавках 9 и 10, при проведении которых введен азот, получено его остаточное содержание соответственно 0,0018 и 0,0033 % (по массе) (содержание азота в сплаве ВЖМ200 не регламентируется).

Одной из основных характеристик, обеспечивающих комплекс служебных свойств литейных жаропрочных никелевых сплавов, является длительная прочность при рабочей температуре. Результаты испытаний на длительную прочность при температуре 1000 °С и напряжении 200 (на базе 100 ч) и 145 МПа (на базе 500 ч) сплава ВЖМ200 с различным содержанием примесей представлены в табл. 1.

В сплаве ВЖМ200 с добавкой кремния (плавки 1 и 2) время до разрушения при температуре 1000 °С и напряжении 200 МПа на базе 100 ч уменьшилось на 24–26 % относительно стандартной плавки, в которую примеси не вводили, однако при испытании на длительной базе (500 ч) при напряжении 145 МПа значения данной характеристики находятся приблизительно на одном уровне со стандартной плавкой. Отрицательное влияние на жаропрочность сплава повышенного содержания кремния (плавка 3: 0,243 % (по массе) [Si]) проявляется при напряжении как 200 ($\tau_{\text{ср}}^{1000} = 60$ ч), так и 145 МПа ($\tau_{\text{ср}}^{1000} = 411$ ч), т. е. время до разрушения соответственно на 36 и 21 % меньше, чем у стандартной плавки.

На плавке 4 (0,0054 % (по массе) [P]) наблюдается некоторое снижение времени до разрушения при температуре 1000 °С и напряжении 200 МПа, однако при напряжении 145 МПа долговечность сплава ВЖМ200 соответствует уровню стандартной плавки. При содержании фосфора в сплаве ВЖМ200 практически на верхнем допустимом

пределе (0,0141 % (по массе) на плавке 5 при норме $\leq 0,015$ % (по массе)) жаропрочность сплава при температуре 1000 °С снижается: время до разрушения при напряжении 200 МПа составило $\tau_{\text{ср}}^{1000} = 61$ ч, что на 38 % меньше, чем у стандартной плавки, а при напряжении 145 МПа – $\tau_{\text{ср}}^{1000} = 420$ ч, т. е. на 19 % меньше.

Таблица 1

**Результаты испытаний сплава ВЖМ200 с различным содержанием примесей
на длительную прочность при температуре 1000 °С
на базах 100 и 500 ч (средние значения)**

Условный номер плавки	Введенная примесь	Содержание примеси, % (по массе)		Время до разрушения τ , ч, при напряжении, МПа	
		фактическое	норма по ТУ (не более)	200 на базе 100 ч	145 на базе 500 ч
0	–	0,021 Si; 0,00065 P; 0,00022 S; 0,0007 N	0,2 Si 0,015 P 0,01 S	99	520
1	Si	0,093	0,2	75*	533*
2		0,166		74*	511
3		0,243		60	411
4	P	0,0054	0,015	82	526
5		0,0141		61	420
6	S	0,0038	0,01	88	447*
7		0,0067		80	473
8		0,0130		77*	424*
9	N	0,0018	–	93*	475
10		0,0033		59	444

* Представлены результаты испытаний одного образца.

В сплаве с содержанием серы, % (по массе): 0,0038 – плавка 6; 0,0067 – плавка 7; 0,0130 – плавка 8, жаропрочность при температуре 1000 °С понижена относительно стандартной плавки. Наиболее выраженное влияние серы наблюдается на плавке 8 (0,0130 % (по массе) [S]): при напряжении 200 МПа – $\tau_{\text{ср}}^{1000} = 77$ ч, а при 145 МПа – $\tau_{\text{ср}}^{1000} = 424$ ч, что соответственно на 22 и 18 % меньше, чем у стандартной плавки.

Установлено также снижение жаропрочности сплава ВЖМ200 с повышением содержания азота при температуре 1000 °С: на плавке 9 (0,0018 % (по массе) [N]) время до разрушения при напряжении 145 МПа составило $\tau_{\text{ср}}^{1000} = 475$ ч против 520 ч на стандартной плавке (0,0007 % (по массе) [N]). На плавке 10 (0,0033 % (по массе) [N]) время до разрушения при напряжении 200 МПа составило всего $\tau_{\text{ср}}^{1000} = 59$ ч, а при 145 МПа – $\tau_{\text{ср}}^{1000} = 444$ ч, т. е. соответственно на 40 и 15 % меньше, чем на стандартной плавке.

Важное место среди механических свойств литейных жаропрочных никелевых сплавов занимают усталостные характеристики [31], так как детали из данных материалов в большинстве случаев претерпевают циклические и знакопеременные нагрузки. Вредные примеси могут оказывать отрицательное влияние на сопротивление материала усталостному разрушению, что показано в работе [32]. Результаты испытаний

на многоцикловую усталость (МнЦУ) сплава ВЖМ200 с различным содержанием примесей при температуре 900 °С на базе 10^7 циклов представлены в табл. 2. При прохождении образцом удвоенной базы ($2 \cdot 10^7$ циклов) испытание прекращали, образец снимали до разрушения.

Таблица 2

**Результаты испытаний на многоцикловую усталость сплава ВЖМ200
с различным содержанием примесей (температура 900 °С
на базе 10^7 циклов при $\sigma_{\max} = 275$ МПа, гладкие образцы)**

Условный номер плавки	Введенная примесь	Содержание примеси, % (по массе)		Результаты испытаний	
		фактическое	норма по ТУ (не более)	Число циклов до разрушения	Состояние образца после испытания
1	Si	0,093	0,2	20 001 101 20 000 202 20 000 202	Снят до разрушения
2		0,166		9 617 704 20 000 021	Разрушен Снят до разрушения
3		0,243		16 599 672 12 162 869	Разрушен
4	P	0,0054	0,015	20 010 008 20 001 102	Снят до разрушения
5		0,0141		10 629 427 14 860 224	Разрушен
6	S	0,0038	0,01	20 000 205 20 001 105	Снят до разрушения
7		0,0067		14 451 953 20 001 103	Разрушен Снят до разрушения
8		0,0130		20 000 204 19 817 793	Снят до разрушения Разрушен
9	N	0,0018	—	20 000 204 20 000 201	Снят до разрушения
10		0,0033		14 648 002 779 443	Разрушен

Видно, что при испытании на МнЦУ при температуре 900 °С с амплитудой нагружения 275 МПа базу из 10^7 циклов прошли все образцы с добавками кремния (кроме одного образца плавки 2, который разрушился близко к базе испытаний, спустя 9 617 704 циклов), фосфора и серы. Самый низкий результат получен на плавке 10 с содержанием азота 0,0033 % (по массе), причем один из образцов не прошел базу и разрушился спустя всего 779 443 циклов. Снижение числа циклов до разрушения отчетливо наблюдается с увеличением содержания азота в сплаве ВЖМ200: на плавке 9 (0,0018 % (по массе) [N]) оба испытанных образца сняты до разрушения после прохождения удвоенной базы испытаний, тогда как на плавке 10 (0,0033 % (по массе) [N]) оба образца разрушились.

С увеличением содержания кремния в сплаве ВЖМ200 снижается количество циклов до разрушения: на плавке 1 (0,093 % (по массе) [Si]) все испытанные образцы прошли удвоенную базу испытаний, на плавке 2 (0,166 % (по массе) [Si]) – только один образец, а на плавке 3 (0,243 % (по массе) [Si]) не прошел ни один из испытанных образцов.

На плавке 4 (0,0054 % (по массе) [P]) оба образца прошли удвоенную базу испытаний и не разрушились, а на плавке 5 (0,0141 % (по массе) [P]) среднее число циклов до разрушения для двух образцов составило 12 744 825.

При испытании по данному режиму оба образца плавки 6 (0,0038 % (по массе) [S]) прошли удвоенную базу испытаний, а на плавках 7 (0,0067 % (по массе) [S]) и 8 (0,013 % (по массе) [S]) – только по одному образцу. При этом явного уменьшения числа циклов до разрушения с увеличением содержания серы в сплаве не наблюдается.

Для испытаний на кратковременное растяжение при температуре 20 °С выбраны плавки с наибольшим содержанием примесных элементов: плавки 3 (0,243 % (по массе) [Si]) и 8 (0,013 % (по массе) [S]), в которых содержание кремния и серы превысило норму ТУ (0,2 и 0,01 % (по массе) соответственно), а также плавка 5 (0,0141 % (по массе) [P]), в которой содержание фосфора близко к максимально допустимому (0,015 % (по массе)) для сплава ВЖМ200. Выбраны также обе плавки с добавкой азота – 9 и 10 (0,0018 и 0,0033 % (по массе) [N] соответственно), поскольку его содержание в них превышает стандартный уровень в сплаве ВЖМ200 – например, в металле опытно-промышленных партий, на которых проведена паспортизация данного материала, содержание азота составляло 0,0004–0,0006 % (по массе). Результаты испытаний на растяжение в сравнении с паспортными данными представлены в табл. 3.

Таблица 3

**Результаты испытаний при растяжении сплава ВЖМ200
с различным содержанием примесей**

Условный номер плавки	Введенная примесь	Содержание примеси, % (по массе)		$\sigma_{\text{в}}$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5 , %
		фактическое	норма по ТУ (не более)			
3	Si	0,243	0,2	1150	1010	7,8
5	P	0,0141	0,015	1130	1000	8,2
8	S	0,0130	0,01	985	950	4,2
9	N	0,0018	—	1060	950	7,0
10		0,0033		1085	1020	5,8
Среднее паспортное значение				1230	990	12,5
Минимальное паспортное значение				1120	970	10,5

Повышенное содержание примесей кремния, фосфора, серы и азота снижает пластичность сплава ВЖМ200 при комнатной температуре. Значения относительного удлинения на всех плавках получены ниже минимальных паспортных значений: с добавкой кремния – на 26 %, с добавкой фосфора – на 22 %, с добавкой серы – на 60 %, с добавкой азота – на 33–45 %. Наименьшие значения относительного удлинения получены на плавках 8 (0,013 % (по массе) [S]) и 10 (0,0033 % (по массе) [N]): 4,2 и 5,8 % соответственно. Кроме того, значения пределов прочности (на плавке 8 с добавкой серы и на плавках 9 и 10 с добавкой азота) и текучести (на плавках 8 и 9) снижены относительно минимального паспортного значения. Таким образом, ни на одном образце с добавкой примесных элементов не получены значения предела прочности, соответствующие или превышающие средний паспортный уровень.

Заключения

Установлено, что в сплаве ВЖМ200 с добавкой кремния, фосфора, серы и азота снижается время до разрушения при испытании на длительную прочность при температуре 1000 °С. В металле с повышенным содержанием кремния (0,243 % (по массе)), фосфора (0,0141 % (по массе)) и азота (0,0033 % (по массе)) время до разрушения при температуре 1000 °С и напряжении 200 МПа снижается на 39; 38 и 40 % соответственно, а при температуре 1000 °С и напряжении 145 МПа – на 21, 19 и 15 % соответственно. Влияние серы более выражено при повышенном содержании (0,0130 % (по массе)) – на

базе 100 ч время до разрушения снижается на 22 %, а на базе 500 ч – на 18 % относительно стандартной плавки без добавления серы.

Установлено снижение значений циклов до разрушения для сплава ВЖМ200 при испытании на МнЦУ при температуре 900 °С с увеличением содержания кремния, а также отрицательное влияние азота на данную характеристику: наименьшее среднее число циклов до разрушения получено в металле с содержанием азота 0,0033 % (по массе).

В металле с повышенным содержанием примесей кремния, фосфора, серы и азота снижается пластичность сплава ВЖМ200 при комнатной температуре – до 60 % относительно минимального паспортного значения. На 12 % снижен также предел прочности относительно минимального паспортного значения в металле с содержанием серы 0,013 % (по массе).

Список источников

1. Тихонов А.И., Краев В.М., Силуянова М.В. Перспективы развития российского авиационного двигателестроения на основе унифицированного газогенератора // СТИН. 2023. № 6. С. 71–74.
2. Мин П.Г., Вадеев В.Е. Разработка и внедрение в серийное производство нового жаропрочного никелевого сплава ВЖЛ125 для лопаток перспективных авиационных двигателей // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 1 (70). Ст. 01. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 02.09.2024). DOI: 0.18577/2713-0193-2023-0-1-3-16.
3. Константинов И.В. Обеспечение технологического суверенитета авиационной отрасли на примере самолета SUKHOI SUPERJET NEW // Научные достижения и инновационные подходы: теория, методология, практика: сб. науч. тр. по материалам VIII Междунар. науч.-практ. конф. Анапа, 2022. С. 99–103.
4. В 2024 году планируют выпустить более 40 двигателей ПД-8 // ИТАР-ТАСС: офиц. сайт. URL: <https://tass-ru/ekonomika/18995881> (дата обращения: 02.09.2024).
5. Мин П.Г., Каблов Д.Е., Сидоров В.В., Вадеев В.Е. Закономерности поведения примесей при получении монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов и разработка эффективных способов их рафинирования // Перспективы развития металлургических технологий: сб. тез. VII Конф. молодых специалистов. М., 2016. С. 36–37.
6. Сидоров В.В. Воздействие примесей и поверхностно-активных добавок на формирование структуры и свойства высокожаропрочных литейных сплавов: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М., 1989. 50 с.
7. Приданцев М.В. Влияние примесей и редкоземельных элементов на свойства сплавов. М.: Металлургиздат, 1962. 208 с.
8. Zhuanggi Hu, Hongwei Song. Effect of Phosphorus on Microstructure and Creep Property of IN718 Superalloy // Journal of material Science Technology. 2005. Vol. 21. P. 73–76.
9. Chao Yuan, Fengshi Yin. Effect of Phosphorus on Microstructure and High Temperature Properties of a cast Ni-base Superalloy // Journal of Material Science Technology. 2002. Vol. 18. No. 6. P. 555–557.
10. Holt R.T., Wallace W. Impurities and trace elements in nickel-base superalloys // International metals reviews. 1976. Vol. 21. No. 1. P. 1–24.
11. Sun C., Huang R.F., Guo J.T., Hu Z.Q. Sulphur distribution in K24 cast nickel-base superalloy and its influence on mechanical properties // High Temperature Technology. 1988. Vol. 6 (3). P. 145–148.
12. Тигрова Г.Д., Коркка С.И., Гребцова Т.М. Влияние кремния на фазовый состав сплавов на никелевой основе // Металловедение и термическая обработка металлов. 1980. № 4. С. 38–41.
13. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Сидоров В.В., Ригин В.Е., Каблов Д.Е. Особенности технологии выплавки и разлива современных литейных высокожаропрочных никелевых сплавов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер.: Машиностроение. 2011. № SP2. С. 68–78.
14. Каблов Д.Е. Закономерности поведения азота при получении монокристаллов жаропрочных никелевых сплавов и повышение их эксплуатационных свойств: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2012. 17 с.

15. Каблов Д.Е., Сидоров В.В., Мин П.Г. Закономерности поведения азота при получении монокристаллов жаропрочных никелевых сплавов и его влияние на их эксплуатационные свойства // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2014. № 1. С. 8–12.
16. Epishin A.L., Svetlov I.L., Petrushin N.V., Loshchinin Yu.V., Link T. Segregation in Single-Crystal Nickel-Base Superalloy // *Defect and Diffusion Forum*. 2011. Vol. 309–310. P. 121–126.
17. Sarioglu C., Stinner C., Blanchere J.R. et al. The Control of Sulfur Content in Nickel-Base, Single Crystal Superalloys and Its Effect on Cyclic Oxidation Resistance // *Superalloys-1996*. 1996. P. 71–80.
18. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Сидоров В.В., Ригин В.Е. Производство литых прутковых (шихтовых) заготовок из современных литейных высокожаропрочных никелевых сплавов // *Тр. Всерос. науч.-техн. конф. «Проблемы и перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершенных фундаментальных исследований и НИОКР»*. Екатеринбург, 2011. С. 31–38.
19. Мин П.Г., Вадеев В.Е., Крамер В.В. Разработка нового жаропрочного никелевого сплава ВЖМ200 и технологии его производства для литья методом направленной кристаллизации рабочих лопаток перспективных двигателей // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 3 (64). Ст. 02. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 02.09.2024). DOI: 10.18577/2071-9140-2021-0-3-11-18.
20. Жаропрочный литейный сплав на основе никеля и изделие, выполненное из него: пат. 2740929 Рос. Федерация. № 2020114551; заявл. 20.04.20; опубл. 21.01.21.
21. Каблов Е.Н., Бондаренко Ю.А., Ечин А.Б. Развитие технологии направленной кристаллизации литейных высокожаропрочных сплавов с переменным управляемым температурным градиентом // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № S. С. 24–38. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-24-38.
22. Герасимов В.В., Висик Е.М., Колядов Е.В. О направленной кристаллизации крупногабаритных отливок на установке УВНК-15 // *Литейное производство*. 2013. № 3. С. 22–24.
23. Герасимов В.В., Колядов Е.В. Технические характеристики и технологические возможности установок УВНК-9А и ВИП-НК для получения монокристаллических отливок из жаропрочных сплавов // *Литейщик России*. 2012. № 11. С. 33–37.
24. Якимович П.В., Алексеев А.В. Определение серы в литейных жаропрочных никелевых сплавах методом масс-спектрометрии высокого разрешения с тлеющим разрядом // *Труды ВИАМ*. 2020. № 1 (85). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 02.09.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-1-118-125.
25. Сидоров В.В., Морозова Г.И., Петрушин Н.В., Кулешова Е.А., Кулебякина А.М., Дмитриева Л.И. Фазовый состав и термостабильность литейного жаропрочного никелевого сплава с кремнием // *Металлы*. 1990. № 1. С. 94–98.
26. Yaoxiao Zhu, John Radavich, Zhi Zheng et al. Development and Long-Time Structural Stability of a Low Segregation Hf Free Superalloys – DZ 125L // *Superalloys-2000*. 2000. P. 329–339.
27. Mc Vay R.V., William P., Meier G.H., Pettit F.S. Oxidation of Low Sulfur Single Crystal Nickel-base Superalloys // *Superalloys-1992*. 1992. P. 807–816.
28. Tammy M. Simpson and Allen R. Price. Oxidation improvements of low sulfur processed superalloys // *Superalloys-2000*. 2000. P. 387–392.
29. Mitchel A. Nitrogen in Superalloys // *High Temperature Materials and Processes*. 2005. Vol. 24. No. 2. P. 101–109.
30. Симс Ч., Хагел В. Жаропрочные сплавы. М.: Металлургия, 1976. 566 с.
31. Горбовец М.А., Ходинев И.А., Карашаев М.М., Рыжков П.В. Испытания на малоцикловую усталость с выдержкой в цикле жаропрочных металлических материалов (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2022. № 5 (111). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 10.09.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-5-123-137.
32. Каблов Д.Е., Беляев М.С., Сидоров В.В., Мин П.Г. Влияние примесей серы и фосфора на малоцикловую усталость монокристаллов жаропрочного сплава ЖС36-ВИ // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 4 (37). С. 25–28. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-4-25-28.

References

1. Tikhonov A.I., Kraev V.M., Siluyanov M.V. Prospects for the Development of Russian Aviation Engine Building Based on a Unified Gas Generator. *STIN*, 2023, no. 6, pp. 71–74.
2. Min P.G., Vadeev V.E. The development and introduction into serial production of the new superalloy VZhL125 for the advanced aviation engines vanes. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 1 (70), paper no. 01. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: September 02, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-3-14.
3. Konstantinov I.V. Ensuring technological sovereignty of the aviation industry using the SUKHOI SUPERJET NEW aircraft as an example. *Scientific achievements and innovative approaches: theory, methodology, practice*: collection of scientific papers based on the materials of the VIII International scientific and practical conf. Anapa, 2022, pp. 99–103.
4. *More than 40 PD-8 engines are planned to be produced in 2024*. Available at: <https://tass.ru/ekonomika/18995881> (accessed: September 02, 2024).
5. Min P.G., Kablov D.E., Sidorov V.V., Vadeev V.E. Patterns of impurity behavior in the production of single-crystal heat-resistant nickel alloys and the development of effective methods for their refining. *Prospects for the development of metallurgical technologies*: abstracts VII Conf. of young specialists. Moscow, 2016, pp. 36–37.
6. Sidorov V.V. *The effect of impurities and surface-active additives on the formation of the structure and properties of high-heat-resistant casting alloys*: thesis abstract, Dr. Sc. (Tech.). Moscow, 1989, 50 p.
7. Pridancev M.V. *The effect of impurities and rare earth elements on the properties of alloys*. Moscow: Metallurgizdat, 1962, 208 p.
8. Zhuanggi Hu, Hongwei Song. Effect of Phosphorus on Microstructure and Creep Property of IN718 Superalloy. *Journal of material Science Technology*, 2005, vol. 21, pp. 73–76.
9. Chao Yuan, Fengshi Yin. Effect of Phosphorus on Microstructure and High Temperature Properties of a cast Ni-base Superalloy. *Journal of Material Science Technology*, 2002, vol. 18, no. 6, pp. 555–557.
10. Holt R.T., Wallace W. Impurities and trace elements in nickel-base superalloys. *International metals reviews*, 1976, vol. 21, no. 1, pp. 1–24.
11. Sun C., Huang R.F., Guo J.T., Hu Z.Q. Sulphur distribution in K24 cast nickel-base superalloy and its influence on mechanical properties. *High Temperature Technology*, 1988, vol. 6 (3), pp. 145–148.
12. Tigrova G.D., Korkka S.I., Grebtsova T.M. Effect of silicon on the phase composition of nickel-based alloys. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 1980, no. 4, pp. 38–41.
13. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Sidorov V.V., Rigin V.E., Kablov D.E. Features of the technology of smelting and pouring modern foundry high-heat-resistant nickel alloys. *Vestnik MGTU im. N.E. Bauman. Ser.: Mashinostroyeniye*, 2011, no. SP2, pp. 68–78.
14. Kablov D.E. *Regularities of nitrogen behavior in the production of single crystals of heat-resistant nickel alloys and improving their performance properties*: thesis abstract, Cand. Sc. (Tech.). Moscow, 2012, 17 p.
15. Kablov D.E., Sidorov V.V., Min P.G. Regularities of nitrogen behavior during production of single crystals of heat-resistant nickel alloys and its influence on their operational properties. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2014, no. 1, pp. 8–12.
16. Epishin A.L., Svetlov I.L., Petrushin N.V., Loshchinin Yu.V., Link T. Segregation in Single-Crystal Nickel-Base Superalloy. *Defect and Diffusion Forum*, 2011, vol. 309–310, pp. 121–126.
17. Sarioglu C., Stinner C., Blanchere J.R. et al. The Control of Sulfur Content in Nickel-Base, Single Crystal Superalloys and Its Effect on Cyclic Oxidation Resistance. *Superalloys-1996*, 1996, pp. 71–80.
18. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Sidorov V.V., Rigin V.E. Production of cast bar (blend) preparations from modern cast high-heat resisting nickel alloys. *All-Rus. Sci.-techn. conf. «Problems and perspectives of development of metallurgy and mechanical engineering with use of complete basic researches and research and development»*, Ekaterenburg, 2011, pp. 31–38.

19. Min P.G., Vadeev V.E., Kramer V.V. The development of the new VZhM200 superalloy and the technology of its production for casting of the advanced engines' blades by the directional crystallization. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 3 (64), paper no. 02. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: September 02, 2024). DOI: 10.18577/2071-9140-2021-0-3-11-18.
20. *Heat resisting cast alloy on the basis of nickel and the product which has been executed of it*: pat. 2740929 Rus. Federation; appl. 20.04.20; publ. 21.01.21.
21. Kablov E.N., Bondarenko Yu.A., Echin A.B. Development of technology of cast superalloys directional solidification with variable controlled temperature gradient. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 24–38. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-24-38.
22. Gerasimov V.V., Visik E.M., Kolyadov E.V. On directional crystallization of large-sized castings on the UVNK-15 unit. *Liteynoe proizvodstvo*, 2013, no. 3, pp. 22–24.
23. Gerasimov V.V., Kolyadov E.V. Technical characteristics and technological capabilities of the UVNK-9A and VIP-NK units for producing single-crystal castings from heat-resistant alloys. *Liteynoe proizvodstvo*, 2012, no. 11, pp. 33–37.
24. Yakimovich P.V., Alekseev A.V. Determination of sulfur in casting heat-resistant nickel alloys by GD-MS. *Trudy VIAM*, 2020, no. 1, paper no. 11. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: September 02, 2024). DOI: 10.18557/2307-6046-2020-0-1-101-108.
25. Sidorov V.V., Morozova G.I., Petrushin N.V., Kuleshova E.A., Kulebyakina A.M., Dmitrieva L.I. Phase composition and thermal stability of cast heat-resistant nickel alloy with silicon. *Metally*, 1990, no. 1, pp. 94–98.
26. Yaoshao Zhu, John Radavich, Zhi Zheng et al. Development and Long-Time Structural Stability of a Low Segregation Hf Free Superalloys – DZ 125L. *Superalloys-2000*, 2000, pp. 329–339.
27. Mc Vay R.V., William P., Meier G.H., Pettit F.S. Oxidation of Low Sulfur Single Crystal Nickel-base Superalloys. *Superalloys-1992*, 1992, pp. 807–816.
28. Tammy M. Simpson and Allen R. Price. Oxidation improvements of low sulfur processed superalloys. *Superalloys-2000*, 2000, pp. 387–392.
29. Mitchel A. Nitrogen in Superalloys. *High Temperature Materials and Processes*, 2005, vol. 24, no. 2, pp. 101–109.
30. Sims C., Hagel V. *Heat-resistant alloys*. Moscow: Metallurgiya, 1976, 566 p.
31. Gorbovets M.A., Hodinev I.A., Karashaev M.M., Ryzhkov P.V. Low cycle dwell fatigue testing of heat resistant metallic materials (review). *Trudy VIAM*, 2022, no. 5 (111), paper no. 11. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: September 10, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-5-123-137.
32. Kablov D.E., Belyaev M.S., Sidorov V.V., Min P.G. The influence of sulfur and phosphorus impurities on low cycle fatigue of single crystals of ZhS36-VI alloy. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 4 (37), pp. 25–28. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-4-25-28.

Информация об авторах

Мин Павел Георгиевич, начальник сектора, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Вадеев Виталий Евгеньевич, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Колесников Станислав Игоревич, техник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Чемов Дмитрий Александрович, техник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Pavel G. Min, Head of Sector, Candidate of Science (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Vitaliy E. Vadeev, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Stanislav I. Kolesnikov, Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Dmitriy A. Chemov, Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 26.09.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 30.09.2024.

The article was submitted 26.09.2024; approved and accepted for publication after reviewing 30.09.2024.

Научная статья

УДК 621.7.011

DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-10-24-33

ПОСТРОЕНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЕФОРМИРУЕМОГО АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА 1163 ДЛЯ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

А.С. Шпагин¹, А.Р. Баженов¹, К.В. Антипов¹, Ю.С. Оглодкова¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. Описан процесс создания реологической модели алюминиевого сплава 1163, предназначенной для использования в программных комплексах для моделирования процессов обработки металлов давлением. Экспериментальным путем получены зависимости напряжения течения сплава от температуры и скорости деформации. По эмпирической модели Хензеля–Шпиттеля рассчитаны коэффициенты, определяющие зависимость напряжения течения от термомеханических параметров. Полученная модель обеспечивает высокую сходимость расчетных и экспериментальных данных.

Ключевые слова: деформируемые алюминиевые сплавы, компьютерное моделирование, реологические свойства, напряжение течения, реологическая модель Хензеля–Шпиттеля

Для цитирования: Шпагин А.С., Баженов А.Р., Антипов К.В., Оглодкова Ю.С. Построение реологической модели деформируемого алюминиевого сплава 1163 для компьютерного моделирования процессов обработки металлов давлением // Труды ВИАМ. 2024. № 10 (140). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-10-24-33.

Scientific article

CONSTRUCTION OF A RHEOLOGICAL MODEL OF DEFORMABLE ALUMINUM ALLOY 1163 FOR COMPUTER SIMULATION OF METAL PRESSURE PROCESSES

A.S. Shpagin¹, A.R. Bazhenov¹, K.V. Antipov¹, Yu.S. Oglochkova¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. The paper describes the process of creating a rheological model of aluminum alloy 1163, intended for use in software packages for modeling metal forming processes. The flow stress curves of the alloy depending on the temperature and strain rate were obtained experimentally. Using the empirical Hensel-Spittel model, the coefficients determining the dependence of the flow stress on the thermomechanical parameters were calculated. The resulting model ensures high convergence of the calculated and experimental data.

Keywords: deformable aluminum alloys, computer modeling, rheological properties, flow stresses, Hensel-Spittel rheological model

For citation: Shpagin A.S., Bazhenov A.R., Antipov K.V., Oglochkova Yu.S. Construction of a rheological model of deformable aluminum alloy 1163 for computer simulation of metal pressure processes. *Trudy VIAM*, 2024, no. 10 (140), paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-10-24-33.

Введение

В настоящее время компьютерное моделирование широко используется при разработке различных технологических процессов обработки металлов давлением. Оно позволяет в значительной мере упростить задачу технологов по проектированию штамповой оснастки и разработке термомеханических режимов деформации.

Использование компьютерного моделирования процессов обработки металлов давлением обеспечивает:

- повышение точности результатов расчета формообразования. Корреляция экспериментальных и расчетных (полученных методом математического моделирования с учетом реологических свойств) данных обеспечена на уровне 90–95 %;
- снижение материальных затрат на проведение прямых экспериментов по отработке технологии обработки давлением в 2–3 раза;
- сокращение трудоемкости операций доработки штамповой оснастки на 50–60 %;
- уменьшение припусков и напусков на 30–40 %, увеличение коэффициента использования материала на 10–15 % [1–3].

Программные комплексы для проведения компьютерного моделирования процессов обработки металлов давлением включают базы данных реологических свойств различных групп металлов и их сплавов. В базах в основном представлены сплавы, разработанные еще в прошлом столетии, и отсутствуют современные перспективные сплавы, используемые в промышленности. В связи с этим разработчики технологий изготовления деформированных полуфабрикатов нередко пользуются реологическими моделями сплавов-аналогов, что неизбежно приводит к ошибкам моделирования и некорректным расчетным данным энергосиловых параметров [4–7].

Для решения данной проблемы и успешного моделирования необходимо создание реологической модели используемого материала. Последовательность создания такой модели состоит из следующих шагов:

- проведение экспериментальных исследований по определению напряжения течения сплава при различных температурах и скоростях деформации;
- расчет коэффициентов, определяющих зависимость напряжения течения от термомеханических параметров деформации, по выбранной эмпирической модели;
- сравнительный анализ экспериментальных и расчетных данных;
- корректировка реологической модели (при необходимости).

Экспериментальные исследования проводятся методом осадки цилиндрических образцов при различных температурах и скоростях деформации. В отличие от испытаний на растяжение и кручение, метод осадки позволяет получить напряжения течения для более высоких значений деформаций.

Кривые «напряжение течения–степень деформации» можно интегрировать в программные комплексы для моделирования в виде табличных данных. Зачастую для этих целей используют различные эмпирические модели, которые применяются во многих программных комплексах, таких как QForm, Deform, Forge3D. Одной из таких моделей является уравнение Хензеля–Шпиттеля с девятью неизвестными коэффициентами, описывающее взаимосвязь между напряжением, температурой, скоростью и степенью деформации материала [8–11].

Для сравнительного анализа проводится моделирование процесса осадки цилиндрических образцов с заданными условиями, максимально приближенными к реальному эксперименту. По результатам оцениваются кривые энергосиловых параметров деформации.

Если при сравнительном анализе выявлены значительные расхождения, то реологическую модель можно скорректировать с помощью поправочного коэффициента.

В данной работе представлена последовательность действий при разработке реологической модели алюминиевого сплава 1163 для дальнейшего моделирования процессов обработки металлов давлением. Сплав 1163 относится к сплавам системы Al–Cu–Mg,

которые нашли широкое применение в различных отраслях машиностроения, особенно в авиации. Сплавы этой системы положили начало применению алюминиевых сплавов в силовых конструкциях. Они обладают необходимым сочетанием характеристик вязкости разрушения, выносливости и скорости роста усталостной трещины. Из них изготавливают основные силовые элементы планера – панели крыла, лонжероны, балки, стыковые гребенки, обшивку гермокабины, основные шпангоуты, детали оперения [12–14].

Материалы и методы

Для изготовления образцов выплавлены слитки из деформируемого алюминиевого сплава 1163 в электрической печи сопротивления и установке для получения слитков методом полунепрерывного литья. Выплавленные слитки подвергли гомогенизационному отжигу для устранения последствий дендритной ликвации и повышения пластичности слитков перед дальнейшей деформацией [15].

Для проведения исследований по определению напряжения течения при различных температурах и скоростях деформации изготовлены цилиндрические образцы диаметром 10 мм и высотой 15 мм. При осадке соотношение высоты и диаметра цилиндрической заготовки должно составлять $\leq 2,5$. Такое соотношение обеспечивает устойчивость заготовки в процессе деформации.

Образцы, предназначенные для исследований при повышенных температурах, вырезаны непосредственно из слитка, прошедшего гомогенизацию. Для исследования напряжения течения сплавов при низких температурах из слитков изготовлены деформированные заготовки методомковки.

Деформацию исходных слитков для получения заготовок под вырезку образцов проводили на вертикальном гидравлическом прессе с усилием 10 МН. Бойки под деформацию предварительно нагревали до температуры 250–300 °С.

Испытания образцов из сплава 1163 проводили методом осадки на комплексе для физического моделирования. Температуры испытаний 20, 100, 150 и 200 °С выбраны для модели холодной деформации; 250, 320, 400 и 450 °С – для модели горячей деформации.

Температурные интервалы деформации для проведения испытаний выбраны исходя из рекомендаций по термомеханической обработке сплава 1163. Кроме того, проведены испытания на сжатие при температуре 500 °С для учета возможного перегрева заготовки в процессе деформации. Однако образцы во время испытаний при данной температуре частично разрушились, что связано с резким снижением пластичности сплава 1163 при температурах >470 °С. В дальнейших расчетах такие данные не учитывали.

Скорость деформации для проведения испытаний составила от 0,01 до 60 с⁻¹. Выбранный интервал скоростей деформации подходит для большинства методов обработки металлов давлением.

Степень деформации (60 %) для проведения испытаний выбрана исходя из значений технологической пластичности сплава 1163.

Деформация проведена по схеме одноосного сжатия между двумя плоскими бойками. Образцы нагрели до температуры деформации прямым пропусканием тока, выдержали при этой температуре ≤ 2 мин и деформировали при различных скоростях. Для каждого значения температуры и скорости испытано по три образца. Графики зависимости напряжения течения от температуры, скорости и степени деформации построены по усредненным значениям.

Данные по напряжениям течения сплава интегрированы в программу QForm в виде отдельных моделей для горячей и холодной деформации. Программный комплекс QForm позволяет моделировать большинство процессов обработки металлов давлением. Значения напряжения течения сплава 1163 интегрированы в программу с помощью эмпирической модели Хензеля–Шпиттеля с девятью неизвестными коэффициентами.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Результаты и обсуждение

Зависимости напряжения течения от степени деформации сплава 1163 при различной температуре, полученные в ходе экспериментальных исследований, представлены на рис. 1.

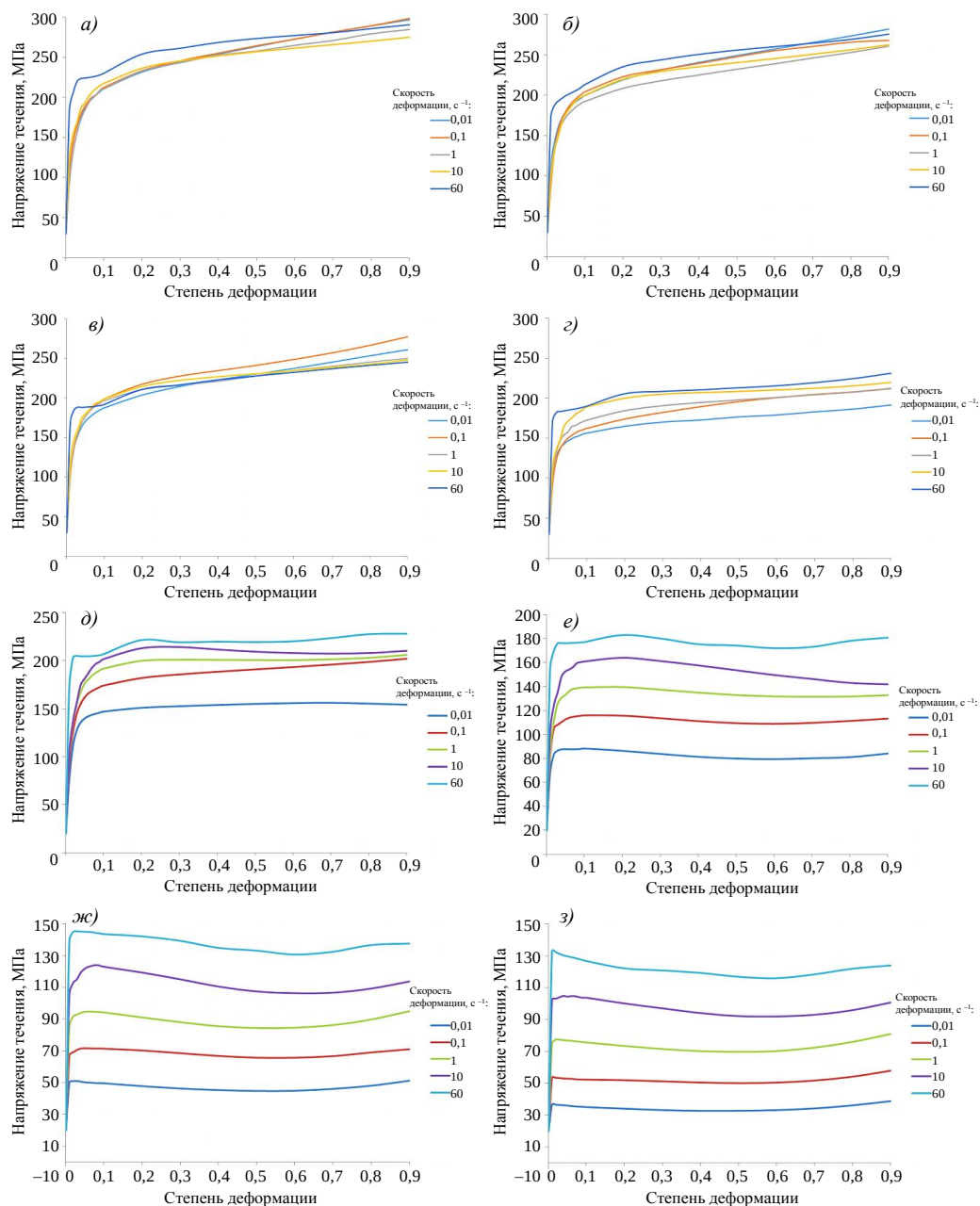


Рис. 1. Зависимости напряжения течения от степени деформации сплава 1163, полученные в результате экспериментальных исследований, при температурах 20 (а), 100 (б), 150 (в), 200 (г), 250 (д), 320 (е), 400 (ж) и 450 °C (з)

Характер полученных кривых типичен для деформируемых алюминиевых сплавов. С повышением температуры деформации уровень напряжения в заготовках снижается, что связано с интенсивными процессами разупрочнения вследствие протекания процессов динамического возврата, рекристаллизации, старения и растворения выделений упрочняющих фаз. Увеличение скорости деформации, напротив, вызывает повышение уровня напряжения из-за высокой скорости деформационного упрочнения.

Для интеграции полученных данных в программы компьютерного моделирования оптимально использовать математические модели, которые описывают зависимость напряжения течения металлов от температуры, скорости и степени деформации с помощью эмпирических коэффициентов. На практике наиболее часто используется эмпирическая модель Хензеля–Шпиттеля с девятью неизвестными коэффициентами:

$$\sigma = A e^{m_1 T} T^{m_2} \epsilon^{m_3} e^{m_4 / \epsilon} (1 + \epsilon)^{m_5} e^{m_7 \dot{\epsilon}} \dot{\epsilon}^{m_8} \epsilon^{m_9 T}, \quad (1)$$

где σ – напряжение течения; T – температура, °C; ϵ – степень деформации; $\dot{\epsilon}$ – скорость деформации, с⁻¹; A , m_1 – m_5 и m_7 – m_9 – эмпирические коэффициенты.

Помимо модели Хензеля–Шпиттеля с девятью коэффициентами, существует эмпирическая модель Хензеля–Шпиттеля с пятью коэффициентами, также описывающая зависимость напряжения течения от температуры, скорости и степени деформации. Однако ее точность недостаточна для построения реологических моделей для компьютерного моделирования процессов обработки металлов давлением при высоких температурах, поэтому в данной работе ее не применяли.

Уравнения решали в программе для выполнения технических вычислений с использованием функции, реализующей метод Левенберга–Марквардта для нахождения неизвестных эмпирических коэффициентов. Полученные значения эмпирических коэффициентов представлены в таблице.

Значения эмпирических коэффициентов для сплава 1163

Эмпирические коэффициенты	Значения эмпирических коэффициентов при температуре, °C	
	20–200	250–500
A	242	3530
m_1	–0,00187	–0,0028
m_2	0,13284	0,07048
m_3	0,002507	–0,08589
m_4	–0,00141	–0,00178
m_5	–0,00119	–0,00317
m_7	0,02953	0,46263
m_8	$5,57 \cdot 10^{-5}$	$5,03 \cdot 10^{-4}$
m_9	0,0749	–0,374

Адекватность полученной модели оценивали путем анализа кривых упрочнения, полученных в результате эксперимента и моделирования процесса осадки, а также по двум критериям, величинам средней ошибки и коэффициента детерминации. Среднюю ошибку рассчитывали по формуле

$$\bar{\epsilon} = \frac{1}{n} \sum \frac{|\sigma_{\text{эксп}} - \sigma_{\text{расч}}|}{\sigma_{\text{эксп}}} \cdot 100 \%, \quad (2)$$

где $\bar{\epsilon}$ – средняя ошибка; $\sigma_{\text{эксп}}$ и $\sigma_{\text{расч}}$ – значения напряжения течения, полученные экспериментальным путем и рассчитанные по формуле (1) соответственно; n – количество повторений.

Коэффициент детерминации рассчитывали по формуле

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_i (y_i - \hat{y})^2}{\sum_i (y_i - \bar{y})^2}, \quad (3)$$

где $\sum_i (y_i - \hat{y})^2$ – сумма квадратов остатков регрессии; $\sum_i (y_i - \bar{y})^2$ – сумма квадратов отклонений точек от среднего значения.

Значение коэффициента детерминации изменяется от 0 до 1. Чем ближе значение к единице, тем более эффективна полученная модель. Значения средней ошибки составили 5,42 и 7,02 % для моделей холодной и горячей деформации соответственно.

Средняя ошибка $<10\%$ считается нормальной для большого объема данных, полученных при решении уравнения нелинейной регрессии. Значения коэффициента детерминации составили 0,95 и 0,97 для моделей холодной и горячей деформации соответственно.

Значения коэффициента детерминации $>0,9$ свидетельствуют о высокой схожести результатов и возможности применения полученной модели.

На рис. 2 представлены зависимости напряжения течения от степени деформации сплава 1163, полученные экспериментальным путем и рассчитанные по формуле (1).

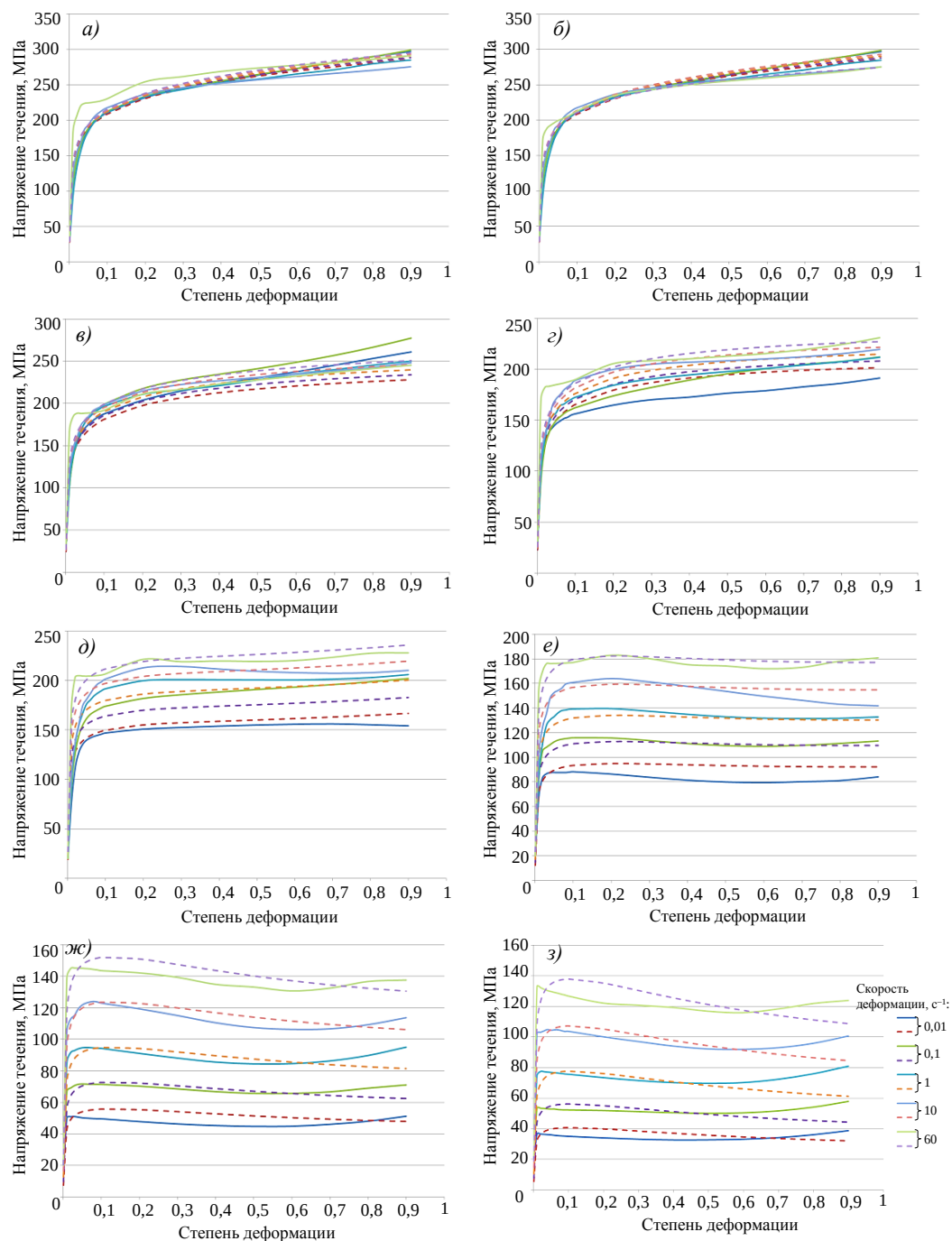


Рис. 2. Зависимости напряжения течения от степени деформации сплава 1163, полученные экспериментальным путем (—) и рассчитанные по формуле (1) (---), при температурах 20 (а), 100 (б), 150 (в), 200 (г), 250 (д), 320 (е), 400 (ж) и 450 °C (з)

Характер полученных кривых сопоставим. При скоростях деформации от $0,1$ до 10 с^{-1} расчетные кривые с высокой степенью точности совпадают с экспериментальными. При скоростях деформации $0,01$ и 60 с^{-1} наблюдаются небольшие отклонения от экспериментальных данных.

Для анализа полученной модели проведено компьютерное моделирование процесса осадки цилиндрических образцов в условиях, максимально приближенных к экспериментальным. Помимо получения зависимостей «напряжение течения–степень деформации», для построения реологической модели сплава необходимо внести в программу значения физических свойств материала, а именно: теплоемкости, теплопроводности, температурного коэффициента линейного расширения, модуля упругости, коэффициента Пуассона, плотности. Значения перечисленных свойств указаны в паспорте на сплав.

Значения напряжения течения сплава 1163 внесены в программу QForm в виде формулы Хензеля–Шпиттеля с девятью коэффициентами для моделей холодной и горячей деформации. Результаты эксперимента и моделирования сравнивали по кривым «усилие–продолжительность деформации». На рис. 3 представлены кривые «усилие–продолжительность деформации», полученные экспериментальным путем и в результате компьютерного моделирования, при температурах 150 и $400 \text{ }^{\circ}\text{C}$ и скоростях деформации 1 и $0,1 \text{ с}^{-1}$ соответственно.

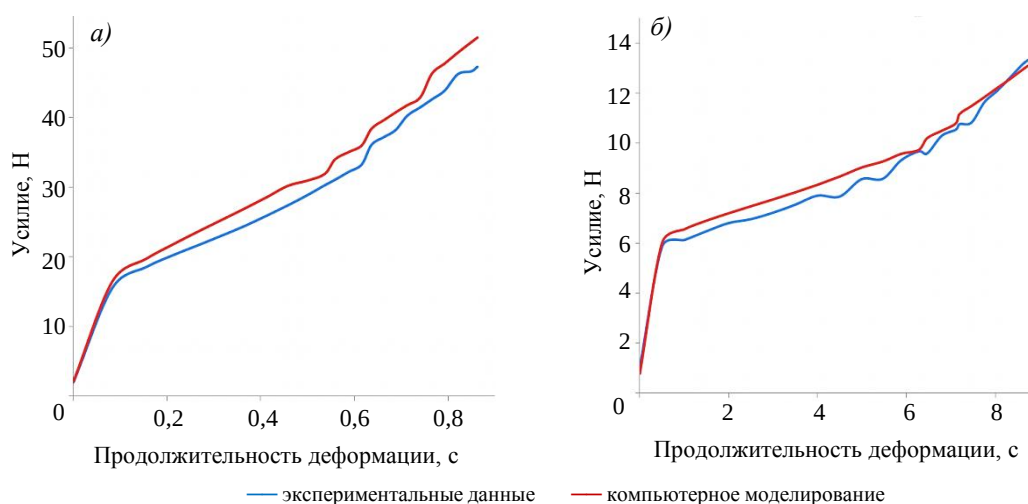


Рис. 3. Зависимости усилия от продолжительности деформации сплава 1163, полученные экспериментальным путем и в результате компьютерного моделирования, при температурах 150 (а) и $400 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (б), скоростях деформации 1 (а) и $0,1 \text{ с}^{-1}$ (б)

Кривые «усилие–продолжительность деформации», полученные экспериментальным путем и в ходе компьютерного моделирования, совпадают. Анализ данных показал, что средняя ошибка составляет 8 и 5% для температур 150 и $400 \text{ }^{\circ}\text{C}$ соответственно, что доказывает возможность применения разработанной реологической модели сплава 1163 для моделирования процессов обработки металлов давлением.

Заключения

Определены напряжения течения деформируемого алюминиевого сплава 1163 при различных температурах, скоростях и степенях деформации методом осадки цилиндрических образцов.

Интеграцию полученных данных в программы для моделирования процессов обработки металлов давлением проводили с помощью эмпирической модели Хензеля–Шпиттеля с девятью неизвестными коэффициентами. Коэффициенты найдены с помощью метода Левенберга–Марквардта в программном комплексе для выполнения технических вычислений. Помимо значений напряжения течения, в реологическую модель внесены показатели физических свойств сплава 1163, указанные в паспорте на материал.

Адекватность полученной модели проверили с помощью сравнительного анализа кривых «напряжение течения–степень деформации», а также расчета средней ошибки и коэффициента детерминации. Установлено, что характер кривых совпадает, величина средней ошибки регрессии не превышает 10 %, а коэффициент детерминации составляет 0,95 и 0,97 для моделей холодной и горячей деформации соответственно. Это свидетельствует о высокой степени достоверности полученных данных и возможности использования реологической модели для моделирования процессов обработки металлов давлением.

Проведенное моделирование процесса осадки цилиндрического образца показало, что размеры осаженных образцов практически совпадают с размерами компьютерной модели. Анализ зависимостей «усилие–продолжительность деформации» также подтвердил высокую сходимость экспериментальных и расчетных данных.

Установлено, что разработанная реологическая модель алюминиевого сплава 1163 может применяться для моделирования различных процессов обработки металлов давлением.

Список источников

1. Оспенникова О.Г., Бубнов М.В., Капитаненко Д.В. Компьютерное моделирование процессов обработки металлов давлением // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. № 5. С. 141–147.
2. Щетинина Н.Д., Рудченко А.С., Селиванов А.А. Применение методов математического моделирования при разработке режимов деформации алюминий-литиевых сплавов (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2020. № 8 (90). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 28.08.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-8-20-34.
3. Капитаненко Д.В., Моисеев Н.В., Баженов А.Р., Гладков Ю.А. Разработка с применением компьютерного моделирования технологии изотермической штамповки на воздухе заготовок дисков турбокомпрессоров // *Труды ВИАМ*. 2022. № 4 (110). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 28.08.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-4-13-21.
4. Шпагин А.С., Кучеряев В.В., Бубнов М.В. Компьютерное моделирование процессов термомеханической обработки жаропрочных никелевых сплавов ВЖ175 и ЭП742 // *Труды ВИАМ*. 2019. № 8 (80). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.08.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-8-27-35.
5. Некрасов Б.Р., Бубнов М.В., Скляренко В.Г. и др. Разработка и оптимизация технологии изготовления штамповки диска из сплава ЭП975-ИД с применением компьютерного моделирования // Тез. докл. молодежной науч.-техн. конф. «Молодежь в авиационном материаловедении». М.: ВИАМ, 2008. С. 25.
6. Цепин М.А., Бегнарский В.В., Лисуец Н.Л. и др. Использование специализированных программ при разработке технологических процессов обработки металлов давлением // *Цветные металлы*. 2007. № 5. С. 98–101.
7. Стебунов С.А., Биба Н.В. Qform – программа, созданная для технологов // *Кузнечно-штамповочное производство*. 2004. № 9. С. 38–43.
8. Во Фан Тхань Дат, Петров П.А., Бурлаков И.А. и др. Получение реологических моделей алюминиевого сплава RS-356 при различных режимах деформации // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2023. Т. 21. № 3. С. 78–88. DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-3-78-88.

9. Потапенко К.Е., Воронков В.И., Петров П.А. Определение модели сопротивления деформации по изотермическим кривым текучести // *Заготовительные производства в машиностроении*. 2013. № 8. С. 32.
10. Полухин П.И., Гун Г.Я., Галкин А.М. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1983. 351 с.
11. Хензель А., Шпиттель Т. Расчет энергосиловых параметров в процессах обработки металлов давлением: пер. с нем. М.: Металлургия, 1982. 360 с.
12. Илларионов Э.И., Колобнев Н.И., Горбунов П.З., Каблов Е.Н. Алюминиевые сплавы в авиакосмической технике / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: Наука, 2001. 192 с.
13. Каблов Е.Н., Лукин В.И., Оспенникова О.Г. Перспективные алюминиевые сплавы и технологии их соединения для изделий авиакосмической техники // Тез. докл. 2-й Междунар. конф. «Алюминий-21. Сварка и пайка». СПб., 2012. Ст. 08.
14. Каблов Е.Н., Дынин Н.В., Бенариев И., Щетинина Н.Д., Самохвалов С.В., Неруш С.В. Перспективные алюминиевые сплавы для паяных конструкций авиационной техники // *Заготовительные производства в машиностроении*. 2021. Т. 19. № 4. С. 179–192.
15. Асташкин А.И., Зайцев Д.В., Селиванов А.А., Ткаченко Е.А. Влияние гомогенизационного отжига на структурно-фазовое состояние и технологическую пластичность слитков из алюминиевого сплава 1163 // *Труды ВИАМ*. 2024. № 7 (137). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 28.08.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-7-12-23.

References

1. Ospennikova O.G., Bubnov M.V., Kapitanenko D.V. Computer modeling of metal working processes by pressure. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2012, no. 5, pp. 141–147.
2. Shchetinina N.D., Rudchenko A.S., Selivanov A.A. The approaches that are used for developed of optimal strain modes of aluminum-lithium alloys (review). *Trudy VIAM*, 2020, no. 8 (90), paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 28, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-8-20-34.
3. Kapitanenko D.V., Moiseev N.V., Bazhenov A.R., Gladkov Yu.A. Development of the isothermal deformation on air technology of production turbocharger disks using computer modeling. *Trudy VIAM*, 2022, no. 4 (110), paper no. 02. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 28, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-4-13-21.
4. Shpagin A.S., Kucheryaev V.V., Bubnov M.V. Computer simulation of thermomechanical processing of heat-resistant nickel alloys VZh175 and EP742. *Trudy VIAM*, 2019, no. 8 (80), paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 20, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-8-27-35.
5. Nekrasov B.R., Bubnov M.V., Sklyarenko V.G. et al. Development and optimization of the technology for manufacturing a stamped disk from EP975-ID alloy using computer modeling. *Reports of the youth scientific and technical conf. «Youth in aviation materials science»*. Moscow: VIAM, 2008, p. 25.
6. Tsepin M.A., Begnarsky V.V., Lisunets N.L. et al. Use of specialized programs in the development of technological processes for metal forming. *Tsvetnye metally*, 2007, no. 5, pp. 98–101.
7. Stebunov S.A., Biba N.V. Qform – a program created for technologists. *Kuznechno-shtampovoye proizvodstvo*, 2004, no. 9, pp. 38–43.
8. Vo Phan Thanh Dat, Petrov P.A., Burlakov I.A. et al. Obtaining rheological models of aluminum alloy RS-356 under various deformation modes. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova*, 2023, vol. 21, no. 3, pp. 78–88. DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-3-78-88.
9. Potapenko K.E., Voronkov V.I., Petrov P.A. Determination of the deformation resistance model based on isothermal yield curves. *Zagotovitelnye proizvodstva v mashinostroyenii*, 2013, no. 8, p. 32.
10. Polukhin P.I., Gun G.Ya., Galkin A.M. *Resistance of plastic deformation of metals and alloys*. Moscow: Metallurgiya, 1983, 351 p.

11. Hensel A., Shpittel T. *Calculation of energy-power parameters in metal forming processes*: trans. from Germ. Moscow: Metallurgiya, 1982, 360 p.
12. Illarionov E.I., Kolobnev N.I., Gorbunov P.Z., Kablov E.N. *Aluminum alloys in aerospace engineering*. Ed. E.N. Kablov. Moscow: Nauka, 2001, 192 p.
13. Kablov E.N., Lukin V.I., Ospennikova O.G. Promising aluminum alloys and their joining technologies for aerospace products. *Reports of the 2nd Int. Conf. «Aluminum-21. Welding and Soldering»*. St. Petersburg, 2012, art. 8.
14. Kablov E.N., Dynin N.V., Benarieb I., Shchetinina N.D., Samokhvalov S.V., Nerush S.V. Promising aluminum alloys for brazed structures of aircraft equipment. *Zagotovitelnye proizvodstva v mashinostroyenii*, 2021, vol. 19, no. 4, pp. 179–192.
15. Astashkin A.I., Zaitsev D.V., Selivanov A.A., Tkachenko E.A. The influence of homogenization annealing on the structural phase evolution and technological plasticity of aluminum alloy 1163 ingots. *Trudy VIAM*, 2024, no. 7 (137), paper no. 02. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 28, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-7-12-23.

Информация об авторах

Шпагин Александр Сергеевич, заместитель начальника лаборатории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Баженов Александр Романович, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Антипов Константин Валерьевич, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Оглодкова Юлия Сергеевна, инженер 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Alexander S. Shpagin, Deputy Head of Laboratory, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Alexander R. Bazhenov, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Konstantin V. Antipov, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Yuliya S. Oglochkova, First Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 17.09.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 18.09.2024.

The article was submitted 17.09.2024; approved and accepted for publication after reviewing 18.09.2024.

Научная статья

УДК 669.018.44:669.295

DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-10-34-44

ИССЛЕДОВАНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ УСТАЛОСТИ МАТЕРИАЛА ЛИСТОВ ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА VT41 ПРИ КОМНАТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ В УСЛОВИЯХ ОДНООСНОГО РАСТЯЖЕНИЯ В МАЛО- И МНОГОЦИКЛОВОЙ ОБЛАСТИ

О.С. Кашапов¹, П.В. Рыжков¹, О.В. Чучман¹, С.А. Наприенко¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. Изложены и обобщены результаты испытаний механических свойств материала промышленных листов толщиной 2,0 мм из жаропрочного титанового сплава марки VT41. Приведены данные по результатам испытаний на растяжение, мало- и многоцикловую усталость гладких образцов. Представлены результаты испытаний образцов на растяжение с корсетной формой рабочей части при различных скоростях нагружения. По результатам испытаний построена кривая в областях статического, повторно-статического, малоциклового и классического многоциклового разрушения.

Ключевые слова: титановые сплавы, механические свойства, сопротивление усталости, листы из титановых сплавов, фазовый состав, псевдо- α -сплавы

Для цитирования: Кашапов О.С., Рыжков П.В., Чучман О.В., Наприенко С.А. Исследование сопротивления усталости материала листов из титанового сплава VT41 при комнатной температуре в условиях одноосного растяжения в мало- и многоцикловой области // Труды ВИАМ. 2024. № 10 (140). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-10-34-44.

Scientific article

INVESTIGATION OF THE FATIGUE STRENGTH OF VT41 TITANIUM ALLOY SHEET MATERIAL AT ROOM TEMPERATURE UNDER UNIAXIAL STRETCHING CONDITIONS IN THE LOW- AND HIGH-CYCLE REGION

O.S. Kashapov¹, P.V. Ryzhkov¹, O.V. Chuchman¹, S.A. Naprienko¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. The article presents and summarizes the test results of the mechanical properties of material of industrial sheets with a thickness of 2,0 mm made of heat-resistant titanium alloy VT41. The results of tensile tests, low- and high-cycle fatigue tests of flat samples are presented as well as the results of tensile testing of samples with a corset shape of the working part at different loading speeds. On the base of tests results a stress-cycles to failure curve is constructed in the areas of static, re-static, low-cycle and classical high-cycle destruction.

Keywords: titanium alloys, mechanical properties, fatigue strength, titanium sheets, phase composition, pseudo- α -alloys

For citation: Kashapov O.S., Ryzhkov P.V., Chuchman O.V., Naprienko S.A. Investigation of the fatigue strength of VT41 titanium alloy sheet material at room temperature under uniaxial stretching conditions in the low- and high-cycle region. *Trudy VIAM*, 2024, no. 10 (140), paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-10-34-44.

Введение

Вопросы сопротивления усталости материалов деталей авиационной техники, связи кривых статического и циклического деформирования особенно остро стоят перед специалистами авиационной промышленности. Эксплуатация новых и существующих изделий проходит в условиях возрастания экстремальных нагрузок при длительном полетном цикле. В настоящее время становится вполне достижимым ресурс деталей газотурбинных двигателей (ГТД) в гигацикловой области усталости [1–3] – даже для тех случаев, где подобная долговечность ранее не предполагалась. Усталостное нагружение для ресурсных изделий оценивают как характерный вид нагрузок в случае статорных корпусных деталей ГТД [4, 5]. Как правило, при эксплуатации имеют место типовые расчетные нагрузки полетного цикла, которые складываются с нагрузками, связанными с воздействием газодинамических сил и конструктивно-технологическими особенностями изделий, и не всегда поддаются учету [6–8]. Модели развития повреждений при циклическом и статическом нагружении служат базовым инструментом для прогнозирования ресурса деталей. Одной из новых областей применения листов из жаропрочных титановых сплавов являются сборочные единицы, входящие в состав выходного устройства ГТД [9]. Успешное применение титановых конструкций можно продемонстрировать на примере такого выходного устройства на пассажирском самолете A380 [10]. Рассматривается применение титановых конструкций выходного устройства для турбовальных вертолетных двигателей [11]. В НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ проведено комплексное исследование материала листов из жаропрочного титанового сплава марки ВТ41 [12]. В данной работе установлен комплекс механических свойств материала листов толщиной от 0,5 до 4,5 мм в отожженном состоянии, исследованы микроструктура и фазовый состав. Предполагаемая область применения – корпусные детали ГТД и другие изделия авиационной техники. В представленной статье изложены результаты исследований, касающиеся характеристик механических свойств при комнатной температуре, полученных при испытаниях на растяжение, мало- и многоцикловую усталость. При испытаниях на растяжение в упругой области нагружения в материале проявляются процессы релаксации на различных дефектах кристаллической решетки и дефектах, вызванных металлургическим процессом изготовления. Интегральная количественная оценка этих процессов содержится в соответствующей части диаграммы растяжения каждого конкретного образца. При циклическом деформировании в области упругопластического поведения (область текучести диаграммы растяжения) функциональная зависимость между напряжениями и деформациями носит нелинейный характер, при этом кривые нагружения при нагрузке и разгрузке не совпадают, что ведет к образованию петель гистерезиса, свидетельствующих о рассеянии энергии [13, 14]. Применявшаяся методика усталостных испытаний для листов из сплава ВТ41 (испытание при растяжении с асимметрией цикла 0,1 на образцах одного типа для мало- и многоцикловой усталости) позволяет провести анализ полученных результатов именно с этой точки зрения.

Исследования выполнены с использованием оборудования Испытательного Центра НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ [15–17] и ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ. Отметим, что вопросы, связанные с влиянием эксплуатационных факторов, а также отдельных технологических операций изготовления листов, деталей и сборочных единиц на физико-механические свойства листов из титановых сплавов, неизменно находятся в поле зрения специалистов

НИИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ [18–20]. Исследования выполнены в рамках реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» [21, 22].

Материалы и методы

Исследования проводили на промышленных горячекатаных листах толщиной 2 мм в отожженном состоянии. Промышленный слиток, выплавленный методом тройного вакуумно-дугового переплава, ковали при температурах β -области на промежуточную заготовку (сляб), далее прокатку сляба осуществляли при температурах β -области. После механической обработки листовую прокатку заготовок проводили в $(\alpha + \beta)$ -области. Тонкие листы толщиной 2 мм получали методом пакетной прокатки при температурах $(\alpha + \beta)$ -области. Химический состав материала листов представлен в виде алюминиевого и молибденового эквивалентов (табл. 1). Термическая обработка листов – одноступенчатый отжиг по режиму, оговоренному в отраслевой технологической документации. Состояние поверхности листов – шлифованное и травленное. Механические свойства листов определяли по стандартным методикам – ГОСТ 1497–84 и ГОСТ 25.502–82, угол изгиба – согласно ОСТ 1 90218–76. Все образцы вырезали поперек направления окончательных операций горячей прокатки.

Таблица 1

Химический состав в алюминиевом и молибденовом эквивалентах для сплава ВТ41 (лист толщиной 2 мм)

Содержание основных химических элементов, % (по массе)		
Ti	[Al]	[Mo]
Основа	8,85	1,79

Механические свойства листов при комнатной температуре, определенные при приемосдаточных испытаниях на металлургическом предприятии ПАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА», приведены в табл. 2. Исследование механических свойств в условиях НИИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ проводили на образцах типа 1 по ГОСТ 1497–84 (табл. 3).

Таблица 2

Результаты приемосдаточных испытаний для угла изгиба и механических свойств при комнатной температуре для сплава ВТ41 (лист толщиной 2 мм)

Предел прочности при растяжении, МПа	Относительное удлинение, %	Угол изгиба, градус
1090	15,9	49
1083	15,7	46
1089	15,6	47

Таблица 3

Результаты испытаний при растяжении при комнатной температуре для сплава ВТ41 (лист толщиной 2 мм)

Модуль упругости E , МПа	Предел пропорциональности $\sigma_{пц}$, МПа	Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Предел прочности при растяжении σ_b , МПа	Относительное удлинение δ , %
114	920	1030	1090	14,5
116	920	1020	1080	14,5
114	920	1020	1080	15,5
115	920	1030	1090	14,5
116	920	1030	1090	14,5

По химическому составу и механическим свойствам материал листов соответствует требованиям действующей нормативной документации на поставку.

Для испытаний на сопротивление усталости использовали образцы (эскиз – на рис. 1), разработанные с учетом требований стандарта ASTM E466. Образцы для испытаний на растяжение при различных скоростях нагружения имели такую же геометрическую форму, как и образцы для испытаний на усталость.

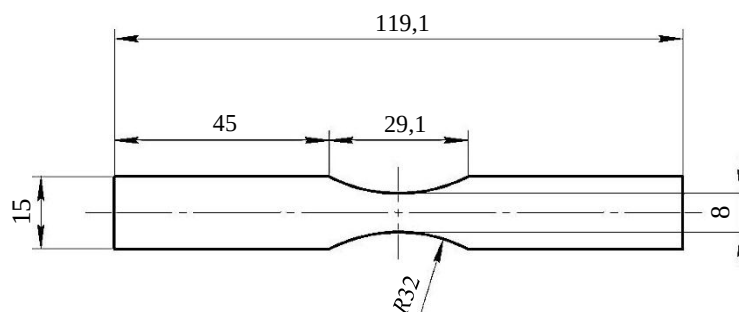


Рис. 1. Образец для испытаний на усталость

Усталостные испытания проводили при асимметричном цикле нагружения $R_\sigma = 0,1$. Частота нагружения для малоциклового области (до $2 \cdot 10^4$ циклов) составила $f = 2$ Гц, для многоциклового области – $f = 40$ Гц. Металлографические исследования проводили на растровом электронном микроскопе.

Результаты и обсуждение

Микроструктура материала листов – преимущественно глобулярная, соответствует 1 типу по 9-типной шкале ГОСТ 26492–85. В материале присутствуют отдельные не-сфероидизированные частицы первичной α -фазы (рис. 2, а, б). При больших увеличениях различимы частицы силицидов титана (светлые частицы с размерностью порядка долей мкм), а также превращенной пластинчатой α -фазы в β -прослойках (рис. 2, в, г).

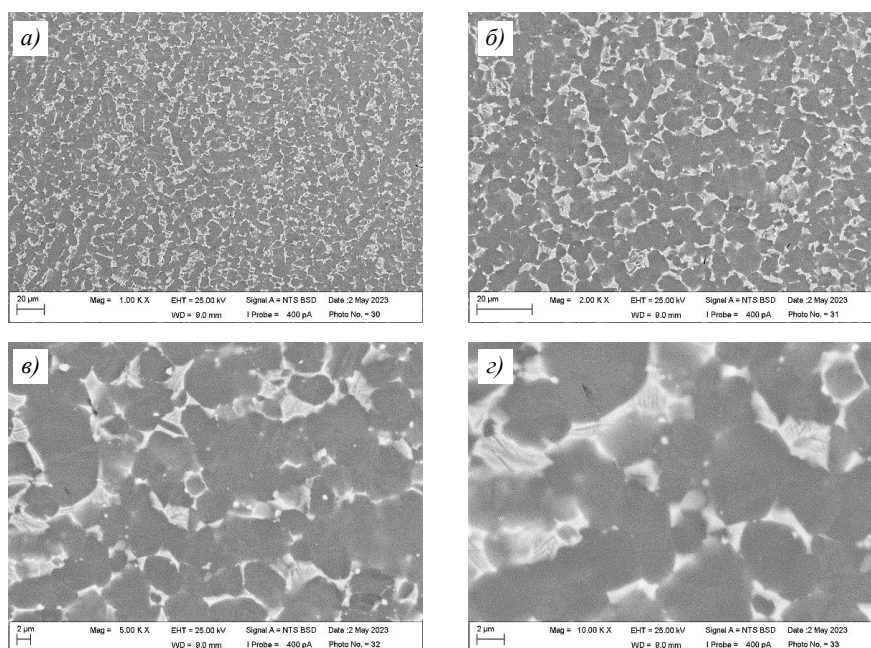


Рис. 2. Микроструктуры (растровая электронная микроскопия) листов из сплава BT41 в отожженном состоянии (после одноступенчатого отжига)

В табл. 4 приведены результаты испытаний листов на сопротивление усталости.

Таблица 4

Результаты испытаний на усталость листов из сплава ВТ41 толщиной 2 мм

Частота нагружения f , Гц	Максимальное напряжение в цикле $\sigma_{\max}$, МПа	Количество циклов до разрушения N	Состояние листа
2	1150	751	Разрушен
	1150	948	
	1150	1147	
	1100	4816	
	1100	5071	
	1100	5148	
	1050	7903	
	1050	8611	
	1050	9447	
	1000	10368	
	1000	12447	
	1000	13578	
	950	17927	
	950	19203	
	950	24862	
40	750	74615	Разрушен
	700	65333	
	600	115111	
	600	3869057	
	600	4050710	
	500	1480736	
	500	2693350	
	500	14804640	
	450	8672881	
	450	12878111	
	450	14212285	
	400	20 000 000	Снят без разрушения
	400	20 000 000	
	400	20 000 105	

На рис. 3 построена кривая усталости по результатам испытаний образцов при двух частотах нагружения. Закономерность увеличения долговечности при снижении уровня напряжений охватывает две группы разрушенных усталостных образцов – преимущественно в малоцикловой области (межкристаллитное развитие усталостного разрушения) и в многоцикловой (внутрикристаллитное).

Статическое разрушение при однократном растяжении стандартных плоских образцов происходит при напряжениях, уровень которых несколько ниже (табл. 3), чем при повторно-статическом нагружении образцов на усталость (табл. 4). Полученный результат указывает на влияние скорости нагружения на напряжение течения и предел прочности при разрыве. Аналитические решения краевых нелинейных задач теории концентрации напряжений практически отсутствуют. В связи с этим для исследования эффектов перераспределения напряжений и деформаций в неупругой области проведены испытания на растяжение при различных скоростях нагружения (рис. 3).

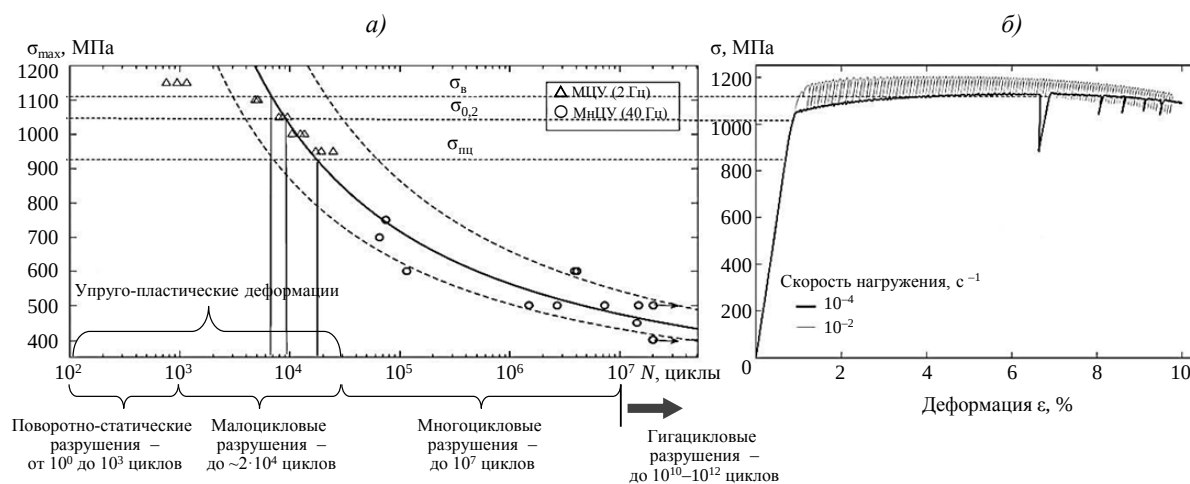


Рис. 3. Возможный вид кривой усталости (а) и связь с фактической диаграммой растяжения (б) листов из сплава ВТ41 с учетом данных работы [1] (МЦУ – малоцикловая усталость; МнЦУ – многоцикловая усталость)

Испытания проведены с постоянной скоростью упругопластической деформации при «жестком» нагружении. Перемещения регистрировали экстензометром, закрепленным на рабочей части образца. Испытание, проведенное при скорости $0,0001 \text{ с}^{-1}$, сопоставимое с испытанием по ГОСТ 1497–84 со скоростью 10 МПа/с , указывает на увеличение условного предела текучести и предела прочности при растяжении в среднем на 30 МПа . Это увеличение напряжения связано с локальной концентрацией напряжений в рабочей части образца для испытаний на усталость. Испытание, проведенное при скорости $0,01 \text{ с}^{-1}$, сопоставимое с испытанием на усталость при частоте 2 Гц , указывает на увеличение условного предела текучести и предела прочности при растяжении в среднем на 100 МПа . Таким образом, уровень нагружения 1150 МПа с долговечностью $\sim 10^3$ циклов не противоречит экспериментальным результатам при растяжении.

Полученный результат не типичен, например, для поковок из сплава ВТ41 с мелкозернистой микроструктурой после двойного отжига [23]. Предел малоцикловой усталости при «мягком» цикле нагружения находится между значениями кратковременной прочности и условного предела текучести ($\sigma_{0.2}^{20^\circ} = 1015\text{--}1115 \text{ МПа}$, $\sigma_{\text{в}}^{20^\circ} = 1070\text{--}1165 \text{ МПа}$, $\sigma_{0.1} = 1040 \text{ МПа}$ на базе 10^4 циклов).

Ошибка при определении характеристик при испытаниях на растяжение исключена, так как данные по результатам приемосдаточных испытаний на металлургическом предприятии и в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ близки по значениям (табл. 2 и 3), а материал листов обладает стабильными характеристиками при однократном растяжении.

В области долговечностей $\sim 10^6$ циклов имеет место смена механизмов разрушения – плосконапряженное состояние материала образца в области переходной долговечности переходит в плоскодеформированное. Переходная долговечность и смена доминирующего механизма разрушения обусловлена уровнем напряжений и однородностью металлического материала. Далее в интервале долговечностей от 10^6 до $2 \cdot 10^7$ циклов наблюдается асимптотическое стремление к определенному значению напряжения.

На рис. 3, б также изображена фактическая диаграмма растяжения для отображения связи с получившейся кривой усталости – отчетливо видно, что область многоциклового усталости лежит в пределах упругих деформаций при напряжениях, не превышающих предел пропорциональности. Сопоставляя предел пропорциональности

и предел выносливости на базе $2 \cdot 10^7$ циклов, получаем, что предел выносливости соответствует значению $0,45\sigma_{\text{пл}}$.

Рассеяние долговечности увеличивается с уменьшением амплитуды напряжений в связи с локализацией деформации по «дефектным» объемам материала и переходом процесса разрушения на новый структурный уровень [24]. В условиях плосконапряженного состояния при повторно-статическом и малоцикловом нагружении неопределенность долговечности сведена к минимуму из-за более интенсивного накопления повреждений. Пластические деформации при этом полностью охватывают рабочую часть образца, а при разрушении около трещин происходят нестационарные процессы циклического пластического деформирования. При этом размеры зон пластических деформаций сопоставимы с размерами трещин нагружаемого материала. С использованием нелинейной аппроксимации результатов испытаний проведено сравнение рассеяния долговечности образцов исследуемого сплава при одноосном нагружении и образцов штамповок из сплава ВТ41 с регламентированной глобулярно-пластинчатой микроструктурой по схеме нагружения при изгибе с вращением (рис. 4).

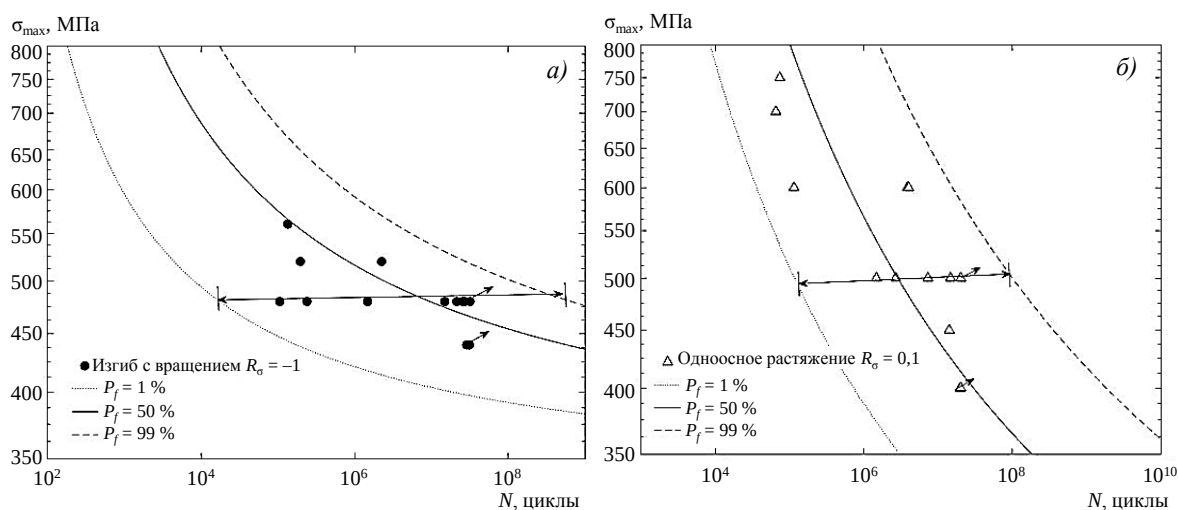


Рис. 4. Кривые усталости для сплава ВТ41 при изгибе с вращением (а) и одноосном растяжении (б) (P_f – вероятность разрушения)

При максимальном напряжении цикла, равном 500 МПа, в случае одноосного нагружения листовых образцов, область интервала рассеяния составляет от 10^5 до 10^8 циклов, в то время как для схемы при изгибе с вращением при максимальном напряжении цикла, равном 490 МПа, область интервала составляет от 10^4 до $5 \cdot 10^8$ циклов. Одной из причин наблюдаемых результатов может быть форма и качество поверхности рабочей части образца, так как боковые поверхности подвергались только чистовому фрезерованию (чистота и качество поверхности оценены в работе [25]). Незначительное различие рассеяния долговечности на выбранном уровне нагружения не позволяет судить с достаточной точностью о влиянии геометрической формы образца, состояния поверхности и схемы нагружения на накопление повреждений при многоцикловом нагружении. Однако если сравнивать две схемы нагружения и различную шероховатость по количеству разрушенных и неразрушенных образцов до достижения базовой долговечности $2 \cdot 10^7$ циклов на рассматриваемом уровне нагружения, то сравнительно большую долговечность демонстрируют образцы, испытанные по схеме при изгибе с вращением с меньшей шероховатостью поверхности. Существует ряд работ, в которых объяснен совокупный эффект влияния шероховатости и градиента напряжений [24, 26]. Как при осевом нагружении, так и при схеме нагружения изгиб с вращением в режиме

многоциклового усталости, очаг разрушения расположен на поверхности. При развитии повреждений в случае схемы нагружения при изгибе с вращением трещины растут не так быстро по причине уменьшения напряжения к центру сечения рабочей части по отношению к осевому нагружению, в котором градиент напряжений отсутствует. Влияние шероховатости проявляется в конкурирующем росте поверхностных трещин на рабочей части образца. Совокупный эффект шероховатости и градиента напряжений в основном реализуется на участке долговечности от 10^5 до 10^6 циклов.

Проведение аналогичных испытаний на листах из сплава ВТ41 в будущих работах позволит провести более детальный анализ особенностей усталостного разрушения во взаимосвязи со степенью дисперсионного упрочнения.

Заключения

При определении средних значений пределов выносливости материала в области малоциклового и многоциклового усталости полученные результаты позволили построить общую кривую усталости по схеме одноосного циклического растяжения. При этом полученные результаты недостаточны для анализа медианной кривой в промежуточной области долговечности от $5 \cdot 10^4$ до 10^6 циклов, где может быть существенное рассеяние долговечности, что, по-видимому, обусловлено переходным механизмом накопления повреждений в результате «квазиупругих» деформаций.

Для исследования эффектов перераспределения напряжений и деформаций в неупругой области проведены испытания на растяжение при различных скоростях нагружения. По результатам испытаний на растяжение корсетных образцов установлено увеличение напряжения течения и предела прочности при разрыве на 30 МПа ввиду концентрации напряжений в рабочей части. Увеличение скорости нагружения, сопоставимой с испытаниями на усталость, привело к увеличению напряжения течения и предела прочности при разрыве на 100 МПа.

При сравнении двух схем нагружения и различной шероховатости поверхности рабочей части в интервале долговечности от 10^6 до $2 \cdot 10^7$ циклов сравнительно большую долговечность демонстрируют образцы, испытанные по схеме при изгибе с вращением, с меньшей шероховатостью поверхности.

Список источников

1. Шанявский А.А., Солдатенков А.П. Масштабные уровни предела усталости металлов // Физическая мезомеханика. 2019. № 1. С. 44–53. DOI: 10.24411/1683-805X-2019-11005.
2. Burago N.G., Nikitin I.S., Shanyavski A.A., Zhuravlev A.B. Durability estimations for in-service titanium compressor disks subjected to multiaxial cyclic loads in low- and very-high-cycle fatigue regimes // Proceedings of 19th European Conference on Fracture (Kazan, Russia, 26–31 Aug. 2012). URL: <https://www.grouppofrattura.it> (дата обращения: 11.02.2024).
3. Белоусов Г.Г., Никитин А.Д., Шанявский А.А. Модель усталостного разрушения в эксплуатации титанового диска вентилятора двигателя ТА12-60 // Научный вестник МГТУГА. 2013. № 187. С. 103–107.
4. Равикович Ю.А., Холобцев Д.П., Архипов А.Н., Шахов А.С. Расчетно-экспериментальное исследование динамики и прочности основных деталей ГТД с учетом геометрических отклонений // Вестник УГАТУ. 2023. Т. 27. № 1 (99). С. 47–59.
5. Соловьев Б.А., Куландин А.А., Макаров Н.В. Устройство и летная эксплуатация силовых установок. М.: Транспорт, 1991. 256 с.
6. Пахоменков А.В. Расчетно-экспериментальное прогнозирование малоциклового долговечности и ресурса дисков ГТД с учетом влияния аналитических и эксплуатационных факторов: дис. ... канд. техн. наук. Рыбинск, 2020. 154 с.
7. Макаров П.В., Колотников М.Е., Веденеев В.В., Абдухакимов Ф.А. Комплексный анализ динамического поведения лопаток компрессора на этапе проектирования // Авиационные двигатели. 2023. № 3 (20). С. 20–27.

8. Петухов А.Н. Проблемы многоциклового усталости конструкционных материалов и деталей ГТД // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2012. № 3 (34). С. 17–25. DOI: 10.18287/2541-7533-2012-0-3-1(34)-17-25.
9. Иноземцев А.А., Сандрацкий В.Л. Газотурбинные двигатели. Пермь: Авиадвигатель, 2006. 1204 с.
10. De Monicault J.-M., Guedou J.-Y., Soniak F. Issues and progress in manufacturing of aero titanium parts // 24th ITA: Titanium conference Proceedings. Las Vegas, 2008. P. 7.
11. Geary B., Bolam V.J., Jenkins S.L., Davies D.P. High temperature titanium sheet for helicopter exhaust applications // 8th Titanium World Conference. London: Cambridge University Press, 1996. P. 1638–1645.
12. Павлова Т.В., Кашапов О.С., Калашников В.С., Кондратьева А.Р. Поковки из жаропрочного титанового сплава BT41 для изготовления корпусов изделий авиационной техники // Труды ВИАМ. 2022. № 9 (115). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 16.02.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-9-39-57.
13. Махутов Н.А., Гденини М.М. Исследование обобщенных кривых статического и циклического деформирования, повреждения и разрушения // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2023. Т. 89. № 5. С. 46–54. DOI: 10.26896/1028-6861-2023-89-5-46-55.
14. Капустин В.И., Захарченко К.В., Черепанова В.К., Шаяпов В.Р. Исследование диссипативных процессов сплава BT6 при усталости // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 4 (69). Ст. 09. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 01.02.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-4-96-111.
15. Горбовец М.А., Ходинев И.А., Монин С.А. Влияние среднего напряжения цикла на характеристики малоциклового усталости жаропрочного никелевого сплава ВЖ175 // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 1 (70). Ст. 10. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 16.02.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-126-136.
16. Горбовец М.А., Ходинев И.А., Каранов В.А., Юшин В.Д. Влияние вида нагружения на многоцикловую усталость жаропрочных сплавов // Труды ВИАМ. 2019. № 3 (75). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 12.02.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-3-96-104.
17. Дуюнова В.А., Путырский С.В., Арисланов А.А., Крохина В.А., Ширяев А.А. Исследование влияния режимов термической обработки на структуру и механические свойства прутков из сплава BT47 // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 4 (65). Ст. 03. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 17.02.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-26-34.
18. Каблов Д.Е., Панин П.В., Ширяев А.А., Ночовная Н.А. Опыт использования вакуумно-дуговой печи ALD VAR L200 для выплавки слитков жаропрочных сплавов на основе алюминидов титана // Авиационные материалы и технологии. 2014. № 2. С. 27–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-2-27-33.
19. Ночовная Н.А., Ширяев А.А. Особенности структурно-фазового состава и механических свойств псевдо- β -титанового сплава BT47, легированного добавками кремния // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 1 (70). Ст. 04. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 15.02.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-51-60.
20. Дзунович Д.А., Лукина Е.А., Яковлев А.Л. Влияние режимов термической обработки на технологичность и механические свойства листов из высокопрочного титанового сплава BT23 // Авиационные материалы и технологии. 2018. № 3 (52). С. 3–10. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-3-10.
21. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. № 1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
22. Антипов В.В. Перспективы развития алюминиевых, магниевых и титановых сплавов для изделий авиационно-космической техники // Авиационные материалы и технологии. 2017. № S. С. 186–194. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-186-194.
23. Каблов Е.Н., Кашапов О.С., Павлова Т.В., Ночовная Н.А. Разработка опытно-промышленной технологии изготовления полуфабрикатов из псевдо- α титанового сплава BT41 // Титан. 2016. № 2 (52). С. 33–42.

24. Shrestha R., Simsiriwong J., Shamsaei N. Fatigue behavior of additive manufactured 316L stainless steel under axial versus rotating-bending loading: Synergistic effects of stress gradient, surface roughness, and volumetric defects // *International Journal of Fatigue*. 2021. Vol. 144. P. 106063. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2020.106063.
25. Медведев П.Н., Кашапов О.С., Решетило Л.П. Исследование поверхностных слоев титанового сплава BT41 после механической обработки // *Вопросы материаловедения*. 2022. № 1 (109). С. 54–63.
26. Derimow N., Benzing J., Newton D., Beamer C. Microstructural effects on the rotating bending fatigue behavior of Ti–6Al–4V produced via laser powder bed fusion with novel heat treatments // *International Journal of Fatigue*. 2024. Vol. 185. P. 108362. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2024.108362.

References

1. Shanyavskiy A.A., Soldatenkov A.P. Large-scale levels of the fatigue limit of metals. *Fizicheskaya mekhanika*, 2019, no. 1, pp. 44–53. DOI: 10.24411/1683-805X-2019-11005.
2. Burago N.G., Nikitin I.S., Shanyavski A.A., Zhuravlev A.B. Durability estimations for in-service titanium compressor disks subjected to multiaxial cyclic loads in low- and very-high-cycle fatigue regimes. *Proceedings of 19th European Conference on Fracture* (Kazan, Russia, 26–31 Aug. 2012). Available at: <https://www.grouppofrattura.it> (accessed: February 11, 2024).
3. Belousov G.G., Nikitin A.D., Shanyavskiy A.A. Model of fatigue failure in operation of a titanium fan disk of the TA12-60 engine. *Nauchnyy vestnik MGTUGA*, 2013, no. 187, pp. 103–107.
4. Ravikovich Yu.A., Kholobtsev D.P., Arkhipov A.N., Shakhov A.S. Calculation and experimental study of the dynamics and strength of the main parts of a gas turbine engine taking into account geometric deviations. *Vestnik UGATU*, 2023, vol. 27, no. 1 (99), pp. 47–59.
5. Soloviev B.A., Kulandin A.A., Makarov N.V. *Design and flight operation of power plants*. Moscow: Transport, 1991, 256 p.
6. Pakhomenkov A.V. *Calculation and experimental forecasting of low-cycle durability and service life of gas turbine engine disks taking into account the influence of analytical and operational factors*: thesis, Cand. Sc. (Tech.). Rybinsk, 2020, 154 p.
7. Makarov P.V., Kolotnikov M.E., Vedenev V.V., Abdukhakimov F.A. Comprehensive analysis of the dynamic behavior of compressor blades at the design stage. *Aviatsionnye dvigateli*, 2023, no. 3 (20), pp. 20–27.
8. Petukhov A.N. Problems of high-cycle fatigue of structural materials and gas turbine engine parts. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta*, 2012, no. 3 (34), pp. 17–25. DOI: 10.18287/2541-7533-2012-0-3-1(34)-17-25.
9. Inozemtsev A.A., Sandratsky V.L. *Gas turbine engines*. Perm: Aviadvigatel, 2006, 1204 p.
10. De Monicault J.-M., Guedou J.-Y., Soniak F. Issues and progress in manufacturing of aero titanium parts. *24th ITA: Titanium Conference Proceedings*. Las Vegas, 2008, p. 7.
11. Geary B., Bolam V.J., Jenkins S.L., Davies D.P. High temperature titanium sheet for helicopter exhaust applications. *8th Titanium World Conference*. London: Cambridge University Press, 1996, pp. 1638–1645.
12. Pavlova T.V., Kashapov O.S., Kalashnikov V.S., Kondrateva A.R. Industrial development of manufacturing large-size forgings from heat-resistant titanium alloy VT41 for welded assemblies of aircraft products. *Trudy VIAM*, 2022, no. 9 (115), paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: February 16, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-9-39-57.
13. Makhutov N.A., Gdenini M.M. Study of generalized curves of static and cyclic deformation, damage and destruction. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*, 2023, vol. 89, no. 5, pp. 46–54. DOI: 10.26896/1028-6861-2023-89-5-46-55.
14. Kapustin V.I., Zakharchenko K.V., Cherepanova V.K., Shayapov V.R. Investigation of dissipative processes of VT6 alloy under fatigue. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 4 (69), paper no. 09. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: February 01, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-4-96-111.
15. Gorbovets M.A., Khodinev I.A., Monin S.A. Influence of average cycle stress on characteristics of low-cycle fatigue of high-temperature nickel alloy VZh175. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 1 (70), paper no. 10. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: February 16, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-126-136.

16. Gorbovets M.A., Khodinev I.A., Karanov V.A., Yushin V.D. Influence of the type of loading on high-cycle fatigue of heat-resistant alloys. *Trudy VIAM*, 2019, no. 3 (75), paper no. 11. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: February 12, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-3-96-104.
17. Duyunova V.A., Putyrskiy S.V., Arislanov A.A., Krokhina V.A., Shiryaev A.A. Analysis of the effect of heat treatment on the structure and mechanical properties of bars made of VT47 titanium alloy. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 4 (65), paper no. 03. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: February 17, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-26-34.
18. Kablov D.E., Panin P.V., Shiryaev A.A., Nochovnaya N.A. The use of ADL VAR L200 vacuum-arc furnace for ingots fabrication of high-temperature titanium aluminides base alloys. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2014, no. 2, pp. 27–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-2-27-33.
19. Nochovnaya N.A., Shiryaev A.A. Features of the structural and phase composition, mechanical properties of metastable β -titanium alloy VT47 alloyed with silicon. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 1 (70), paper no. 04. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: February 15, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-51-60.
20. Dzunovich D.A., Lukina E.A., Yakovlev A.L. Influence of heat treatment parameters on producibility and mechanical properties of sheets made from high-strength titanium alloy VT23. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 3 (52), pp. 3–10. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-3-10.
21. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
22. Antipov V.V. Prospects for development of aluminium, magnesium and titanium alloys for aerospace engineering. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 186–194. DOI: 10.18577/2107-9140-2017-0-S-186-194.
23. Kablov E.N., Kashapov O.S., Pavlova T.V., Nochovnaya N.A. Development of a pilot industrial technology for the production of semi-finished products from pseudo- α titanium alloy VT41. *Titan*, 2016, no. 2 (52), pp. 33–42.
24. Shrestha R., Simsiriwong J., Shamsaei N. Fatigue behavior of additive manufactured 316L stainless steel under axial versus rotating-bending loading: Synergistic effects of stress gradient, surface roughness, and volumetric defects. *International Journal of Fatigue*, 2021, vol. 144, p. 106063. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2020.106063.
25. Medvedev P.N., Kashapov O.S., Reshetilo L.P. Study of surface layers of titanium alloy VT41 after mechanical treatment. *Voprosy materialovedeniya*, 2022, no. 1 (109), pp. 54–63.
26. Derimow N., Benzing J., Newton D., Beamer C. Microstructural effects on the rotating bending fatigue behavior of Ti–6Al–4V produced via laser powder bed fusion with novel heat treatments. *International Journal of Fatigue*, 2024, vol. 185, p. 108362. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2024.108362.

Информация об авторах

Кашапов Олег Салаватович, начальник сектора, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Рыжков Петр Валерьевич, научный сотрудник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Чучман Олег Викторович, техник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Наприенко Сергей Александрович, начальник сектора, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Oleg S. Kashapov, Head of Sector, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Peter V. Ryzhkov, Researcher, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Oleg V. Chuchman, Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Sergey A. Naprienko, Head of Sector, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 22.02.2024; получена после доработки 29.07.2024;
одобрена и принята к публикации после рецензирования 29.07.2024.
The article was submitted 22.02.2024; received in revised form 29.07.2024;
approved and accepted for publication after reviewing 29.07.2024.

Научная статья

УДК 678.8

DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-10-45-62

ЭФФЕКТ ВЗАИМНОГО УПРОЧНЕНИЯ В ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТАХ НА ОСНОВЕ ПОЛИЭФИРЭФИРКЕТОНА И ТЕРМОТРОПНЫХ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПОЛИМЕРОВ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ 3D-ПЕЧАТИ

Д.А. Гуров¹, А.Н. Цапенко¹, Н.Г. Павлюкович¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. Показаны зависимости механических и теплофизических характеристик в образцах с различным соотношением полиэфирэфиркетона (ПЭЭК) и жидкокристаллических полимеров (ЖКП), синтезированных методом послойного наплавления нити. Показано, что для определенных концентраций при добавлении ЖКП в состав ПЭЭК возможно увеличить механические характеристики по сравнению с материалом, синтезированным методом FDM из ненаполненного ПЭЭК. Показано наличие фибрилл и коаксиальных оболочек между слоями 3D-синтезированного органического композиционного пластика и внутри самих нитей. Предложена взаимосвязь между микроструктурой синтезированных методом FDM образцов и их механическими свойствами.

Ключевые слова: аддитивные технологии, послойная экструзия полимерной нити, полиэфирэфиркетон, полукристаллический полимер, термотропные жидкокристаллические полимеры, упрочнение вдоль оси Z

Для цитирования: Гуров Д.А., Цапенко А.Н., Павлюкович Н.Г. Эффект взаимного упрочнения в полимерных композитах на основе полиэфирэфиркетона и термотропных жидкокристаллических полимеров, полученных методом 3D-печати // Труды ВИАМ. 2024. № 10 (140). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-10-45-62.

Scientific article

EFFECT OF MUTUAL STRENGTHENING IN POLYMER COMPOSITES BASED ON POLYETHERETHERKETONE AND THERMOTROPIC LIQUID CRYSTAL POLYMERS OBTAINED BY 3D-PRINTING

D.A. Gurov¹, A.N. Tsapenko¹, N.G. Pavlukovich¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. The dependences of the mechanical and thermophysical characteristics in samples with different ratios of polyetheretherketone (PEEK) and liquid crystalline polymers (LCP), synthesized by layer-by-layer filament deposition, are shown. It has been shown for certain concentrations, adding LCP to PEEK can increase the mechanical characteristics compared to the material synthesized by FDM from unfilled PEEK. The presence of fibrils and coaxial shells between the layers of 3D-synthesized organic composite plastic and inside the threads themselves is shown. A relationship has been proposed between the microstructure of samples synthesized by FDM and their mechanical properties.

Keywords: additive technologies, fused deposition modeling, polyetheretherketone, semi-crystalline polymer, thermotropic liquid crystal polymers, Z-axis strengthening

For citation: Gurov D.A., Tsapenko A.N., Pavlukovich N.G. Effect of mutual strengthening in polymer composites based on polyetheretherketone and thermotropic liquid crystal polymers obtained by 3D-printing. *Trudy VIAM*, 2024, no. 10 (140), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-10-45-62.

Введение

В настоящее время 3D-печать полимерами существенно ограничена для применения из-за довольно узкого спектра механических характеристик получаемых деталей и температур эксплуатации. Для повышения уровня указанных характеристик применяются, например, наноразмерные углеродные наполнители [1, 2].

Для FDM-печати средненагруженных элементов конструкций, которые могут работать при повышенных температурах, применяются конструкционные терmostойкие термопласты, основными представителями которых являются полимеры из класса полиарилэфиркетонов (ПАЭК), обладающие высокими упруго-прочностными свойствами, высокими влаго- и химической стойкостью, а также возможностью их длительной эксплуатации [3–10].

Технология FDM, развивающаяся с 1989 г., в данное время применяется не только для изготовления прототипов, но и для печати полнофункциональных изделий в авиакосмической отрасли (SpaceX, Boeing, Airbus, Nasa), автомобилестроении (Mercedes-Benz, BMW, Audi AG, Lamborghini, Bentley Motors), медицине (UPSA), а также в военно-промышленном комплексе (Boeing, Northrop Corp.) [11–35].

Из полимера изготавливают филамент, который затем поступает в FDM-принтер. Например, филамент на основе полиэфиркетонкетона (ПЭКК) сертифицирован компанией Boeing для печати «готовых-к-полету» изделий [36–38]. Отметим, что в России в настоящее время промышленное производство филаментов на основе термопластов такого класса и качества отсутствует.

Несмотря на быстрое развитие авиационной техники и полимерного материаловедения, на данный момент не удастся найти простое решение главной проблемы, заключающейся в анизотропии свойств получаемых методом FDM изделий, а именно – снижение упруго-прочностных характеристик вдоль оси Z, т.е. перпендикулярно слоям выкладки. Для решения проблемы межслоевой адгезии и увеличения физико-механических свойств FDM-изделий, в данной работе предлагается применить армирование ПЭК-матрицы жидкокристаллическими полимерами (ЖКП) [39–41].

Термотропные ЖКП обладают уникальными свойствами жидких кристаллов, образованных из жестких органических молекул асимметричной вытянутой формы – мезогенов. При экструзии при температуре выше температуры жидкокристаллического (ЖК) перехода реализуются специфические термотропные свойства ЖК-систем – образуется система с явно выраженной анизотропией: мезогены выстраиваются по направлению приложенного сдвига, формируя жидкокристаллическую нематическую фазу из стержнеобразных молекул – каламитиков [42].

Материалы и методы

Для проведения физико-механических исследований методом FDM-печати изготовлены образцы лопаток (тип 5) различных составов полимерного композита для испытания на разрыв согласно ГОСТ 11262–2017, а также образцы брусков для испытания на изгиб согласно ГОСТ 4648–2014. При этом для оценки прочности вдоль оси Z образцы лопаток и брусков напечатаны в направлениях «плашмя» и «ребром».

Для печати образцов использованы полимерные композиционные филаменты состава 20%ЖКП + 80%ПЭК, 60%ЖКП + 40%ПЭК и 40%ЖКП + 60%ПЭК (здесь и далее – % (по массе)).

Печать образцов «горизонтальных» лопаток (направление печати ХУ) для проведения испытаний на растяжение проводили при следующих параметрах печати:

Температура, °C:	
стола построения	150
камеры принтера	250
сопла принтера	440
Скорость печати, мм/с	15–45
Угол укладки нитей расплава, градус	±45
Диаметр сопла принтера, мм	0,6

Для оценки межслоевой адгезии в направлении печати ХZ изготовлены образцы лопаток (тип 5) двух составов 20%ЖКП + 80%ПЭЭК и 60%ЖКП + 40%ПЭЭК – печать «ребром» при следующих параметрах печати:

Температура, °C:	
стола построения	160
камеры принтера	265
сопла принтера	440
Скорость печати, мм/с	15
Направление однонаправленной укладки нитей, градус	0

В качестве образцов сравнения изготовлены лопатки из филамента состава 100%-ный ПЭЭК (печать «ребром») при параметрах печати, как для образцов двух предыдущих составов.

Для уменьшения коробления деталей в процессе печати, возникающего вследствие различия значений температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР) силикатного стекла, из которого изготовлен стол построения печати, и полимером, применяли высокотемпературный клей для создания прочной адгезионной связи между стеклом и полимером, которая дает возможность полимеру усаживаться, не отклеиваясь при этом от стола построения. Все филаменты дополнительно высушивали перед печатью в вакуумном термошкафу при температуре 110 °C. Для исключения влияния фактора «неправильной» скорости охлаждения при кристаллизации дополнительно после печати все полученные образцы подвергали термической обработке – отжигу на воздухе при температуре 100 °C в течение 1 ч, далее при 200 °C дополнительно еще 1 ч, затем проводили естественное охлаждение в закрытом термошкафу.

Для проведения испытаний на изгиб напечатаны бруски размерами 5×10×80 мм и 5×10×50 мм из филаментов составов 100%-ный ПЭЭК (образцы сравнения) и 80%ЖКП + 20%ПЭЭК с параметрами печати, как для предыдущих двух составов.

Морфологические исследования сколов (торцов) образцов лопаток монослойных пленок, напечатанных из композиционного полимерного филамента, после их разрушения в процессе проведения испытаний физико-механических характеристик проводили методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ).

Методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) в режиме термосканирования в процессе нагрева со скоростью 10 °C/мин проведены исследования фрагментов испытанных на растяжение лопаток, напечатанных в направлениях «плашмя» и «ребром». Для исключения вклада ориентированности макромолекул, возникшей в результате деформации растяжения в образцах во время их испытаний, образцы для ДСК-анализа вырезали бокорезами из фрагмента образца лопатки, который помещается в зажимы разрывной машины, но при этом не на самих краях образца.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Результаты и обсуждение

На рис. 1 показаны образцы «горизонтальных» лопаток (направление печати ХУ) из полимерного композиционного филамента состава 20%ЖКП + 80%ПЭЭК. Все изготовленные образцы лопаток имели ровные края и четко выраженные грани с отсутствием наплывов и коробления. Наблюдаемая переэкструзия возникла вследствие избыточной подачи материала, которая намеренно сделана для увеличения прочности образца вследствие уменьшения воздушных промежутков между нитями расплава. Пленку печатали с однонаправленной укладкой нитей, при этом она частично расслоилась при съеме со стола построения.



Рис. 1. Образцы лопаток и пленки, полученные из филамента состава 20%ЖКП + 80%ПЭЭК

На рис. 2 показаны образцы «горизонтальных» лопаток (горизонтальное направление печати ХУ) из полимерного композиционного филамента состава 60%ЖКП + 40%ПЭЭК. Все изготовленные образцы лопаток имели ровный контур печати с отсутствием коробления, однако образовавшиеся пустоты на кромках лопаток свидетельствуют о высокой вязкости расплава и об ограниченной диффузии между нитями расплава вследствие этого.

На рис. 3 показаны образцы «горизонтальных» лопаток (направление печати ХУ) из полимерного композиционного филамента состава 40%ЖКП + 60%ПЭЭК. Все изготовленные образцы лопаток имели ровный контур печати, однако с ярко выраженными признаками коробления. На образцах также можно наблюдать выраженные следы наплывов. В отличие от филамента состава 60%ЖКП + 40%ПЭЭК пустоты на кромках лопаток отсутствовали, что свидетельствует о диффузии расплава нити в уже выложенный слой.



Рис. 2. Образцы лопаток и пленки, полученные из филамента состава 60%ЖКП + 40%ПЭЭК



Рис. 3. Образцы лопаток, полученные из филамента состава 40%ЖКП + 60%ПЭЭК

Образцы, полученные в результате печати «ребром» из филамента состава 60%ЖКП + 40%ПЭЭК в направлении печати XZ, представлены на рис. 4.

На рис. 5 показаны фотографии образцов лопаток из филамента состава 100%-ный ПЭЭК (печать «ребром»). Все изготовленные образцы лопаток имели ровные края и четко выраженные грани с отсутствием наплывов и коробления.

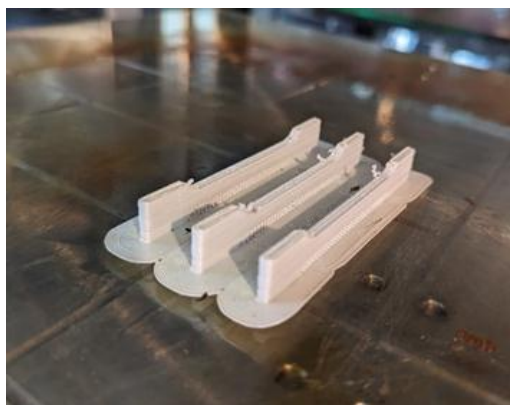


Рис. 4. Образцы лопаток, изготовленные из филамента состава 60%ЖКП + 40%ПЭЭК (печать «ребром»)



Рис. 5. Образцы лопаток, изготовленные из филамента состава 100%-ный ПЭЭК (печать «ребром»)

На рис. 6 показаны бруски (печать «ребром»), изготовленные из филамента состава 20%ЖКП + 80%ПЭЭК. Все изготовленные образцы лопаток имели ровные края и четко выраженные грани с отсутствием наплывов и коробления.



Рис. 6. Образцы брусков, изготовленные из филамента состава 20%ЖКП + 80%ПЭЭК (печать «ребром»)

В процессе печати филаментом состава 40%ЖКП + 60%ПЭЭК возникли трудности: несмотря на то, что изготовление на экструзионном оборудовании филамента состава 60%ЖКП + 40%ПЭЭК было технологически существенно более сложным, чем филамента состава 40%ЖКП + 60%ПЭЭК, процесс печати образцов из него проходил намного стабильнее в части отсутствия трудностей с забиванием сопла принтера и образования наплывов на получаемых образцах. При некоторых режимах печати получение образцов из филамента состава 40%ЖКП + 60%ПЭЭК было фактически невозможно вследствие забивания сопла принтера и последующей остановки печати, поэтому данные по результатам исследований образцов на основе филамента данного состава представлены неполно.

В табл. 1 приведены результаты физико-механических испытаний при растяжении лопаток при направлении печати ХУ, температурах сопла и стола построения соответственно 440 и 150 °С, при различной скорости печати.

Таблица 1

Результаты физико-механических испытаний лопаток (направление печати ХУ)

Состав филамента, % (по массе)	Скорость печати, мм/с	Предел прочности при разрыве, МПа	Модуль упругости при растяжении, ГПа	Относительное удлинение, %
40%ЖКП + 60%ПЭЭК	45	28,79	2,1	2,2
		31,04	2,21	2,5
		26,33	2,14	2,1
	30	30,66	2,09	2,5
		24,41	2,12	1,6
60%ЖКП + 40%ПЭЭК	30	39,11	2,17	3,3
		41,61	2,13	3,6
	15	48,08	2,28	5,8
		50,10	2,4	5,2
20%ЖКП + 80%ПЭЭК	45	44,34	2,59	2,4
		50,96	2,68	2,8
		54,34	2,66	3,3
	15	63,61	2,60	3,8
	45	50,51	2,65	3,0
		63,10	2,55	3,8

На основании результатов физико-механических испытаний «горизонтальных» образцов лопаток, полученных методом FDM-печати, можно сделать следующие выводы. Как отмечалось ранее, наиболее стабильная печать осуществлена на двух составах композиционного филамента: 20%ЖКП + 80%ПЭЭК и 60%ЖКП + 40%ПЭЭК. Это коррелирует с полученными результатами физико-механических испытаний. Наилучшие результаты получены на составе 20%ЖКП + 80%ПЭЭК – прочность при разрыве

63 МПа, модуль упругости при растяжении 2,6 ГПа, относительное удлинение 3,8 %. При этом скорость печати существенно не влияла на физико-механические характеристики полученных образцов. Отметим, что, поскольку образцы во время испытаний на растяжение «работают» вдоль слоя выкладки при печати, вклад межслоевой адгезии по оси Z в результаты испытаний на растяжение минимален. Полученные результаты, скорее, можно отнести к величине диффузии между нитями расплава во время их выкладки в процессе формирования печатного слоя.

Таблица 2

**Результаты испытаний на растяжение лопаток
(печать «ребром» при скорости 15 мм/с и температуре сопла 440 °С)**

Состав филамента, % (по массе)	Температура стола построения, °С	Предел прочности при растяжении, МПа	Модуль упругости при растяжении, ГПа	Относительное удлинение, %
100%-ный ПЭЭК	160	79,06	2,29	4,8
		66,05	2,29	3,6
20%ЖКП + 80%ПЭЭК	160	92,78	2,87	6,5
		104,19	3,07	5,3
	160*	51,48	1,46	9,3
60%ЖКП + 40%ПЭЭК	160	70,25	2,31	4,9
	150	72,09	2,35	4,5
	150	73,17	2,42	4,1

* Испытание при температуре 150 °С.

По результатам испытаний при растяжении (табл. 2) лопаток, напечатанных «ребром», из двух составов 20%ЖКП + 80%ПЭЭК и 60%ЖКП + 40%ПЭЭК, а также состава 100%-ный ПЭЭК в качестве образцов сравнения можно сделать следующие выводы. Поскольку направление нитей расплава в процессе печати совпадает с направлением деформации в процессе испытаний, вклад в значения прочностных характеристик обеспечивает как прочность самой нити, так и прочность слоя, которая в данном случае в отличие от горизонтальной печати обеспечивается межслоевой адгезией вдоль оси Z. По результатам испытаний наилучший результат вновь показал состав 20%ЖКП + 80%ПЭЭК, при этом полученные результаты выше референсных (от 13 до 37 %) в части прочности при разрыве. При повышенной температуре испытаний (150 °С) при разрыве образцы сохранили более 50 % свойств в части прочности, что свидетельствует о хорошей межслоевой адгезии по оси Z.

Таблица 3

Результаты испытаний на изгиб лопаток (печать «ребром» при скорости 15 мм/с и температурах сопла 440 °С и стола построения 160 °С)

Состав филамента, % (по массе)	Предел прочности при изгибе, МПа
100%-ный ПЭЭК	138
	140
20%ЖКП + 80%ПЭЭК	150
	155

По результатам испытаний на изгиб (табл. 3) образцы, полученные из композиционного состава 20%ЖКП + 80%ПЭЭК, показали более высокие значения прочности с квотами превосходства по сравнению с образцами, изготовленными из 100%-ного ПЭЭК, – от 7 до 11 %.

Микрофотографии поверхности сколов торцов после растяжения образцов лопаток различных составов, полученные методом СЭМ, представлены на рис. 7–18.

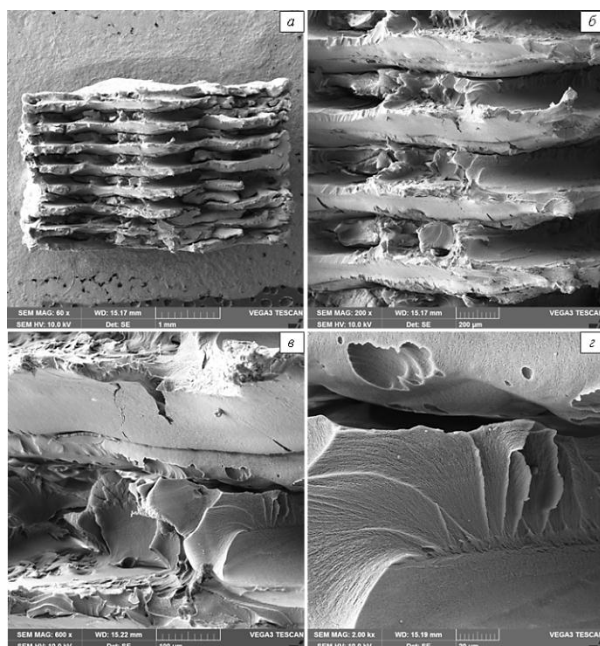


Рис. 7. Микроструктура зоны разрушения образца состава 100%-ный ПЭЭК (горизонтальная печать) после испытания: *а* – общий вид зоны разрушения; *б* – участок в зоне разрушения; *в* – граница между слоями; *г* – трещина между слоями

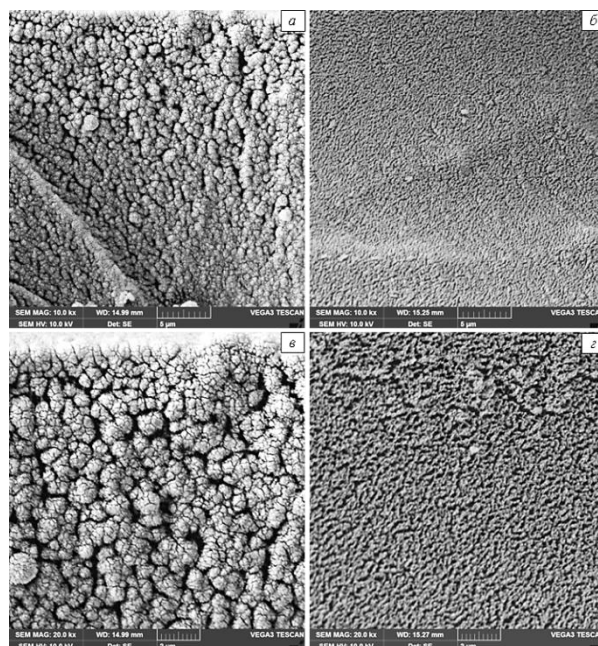


Рис. 8. Микроструктура зоны разрушения образца состава 100%-ный ПЭЭК (горизонтальная печать) после испытания – микрофазовая структура основной матрицы (*а, в*) и матрицы гребня (*б, г*)

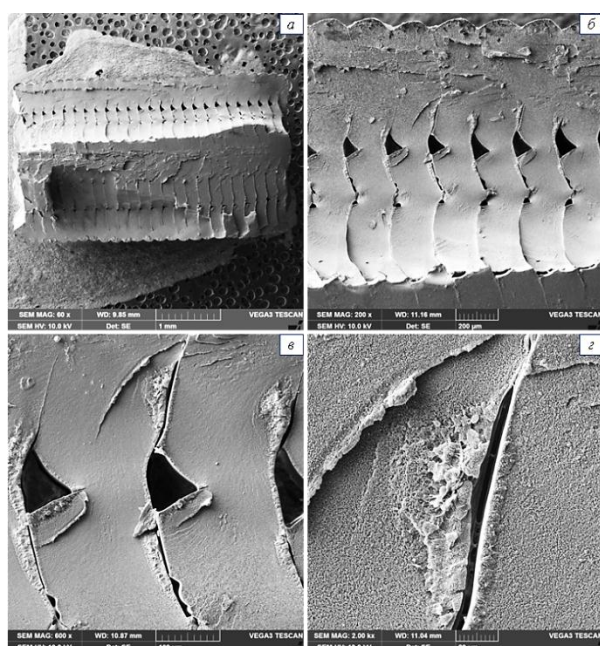


Рис. 9. Микроструктура зоны разрушения образца состава 100%-ный ПЭЭК (вертикальная печать) после испытания: *а* – общий вид зоны разрушения; *б* – участок в зоне разрушения; *в* – граница между слоями; *г* – трещина между слоями

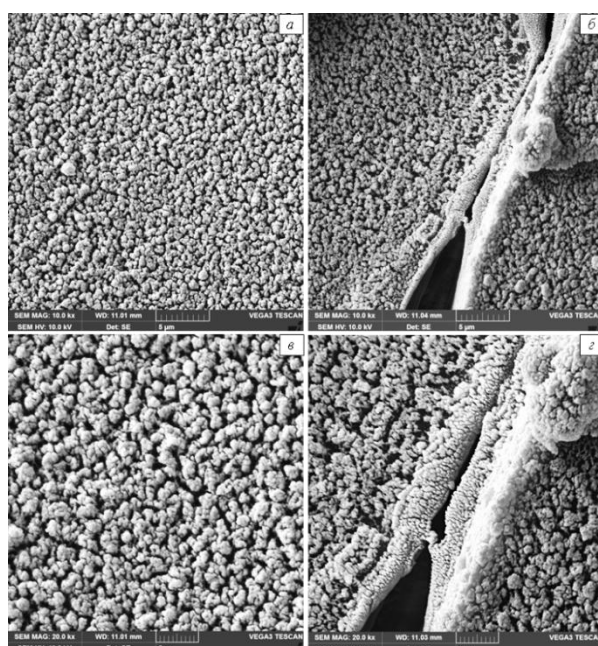


Рис. 10. Микроструктура зоны разрушения образца состава 100%-ный ПЭЭК (вертикальная печать) после испытания – микрофазовая структура матрицы (*а, в*), трещина между слоями (*б*) и берега трещины (*г*)

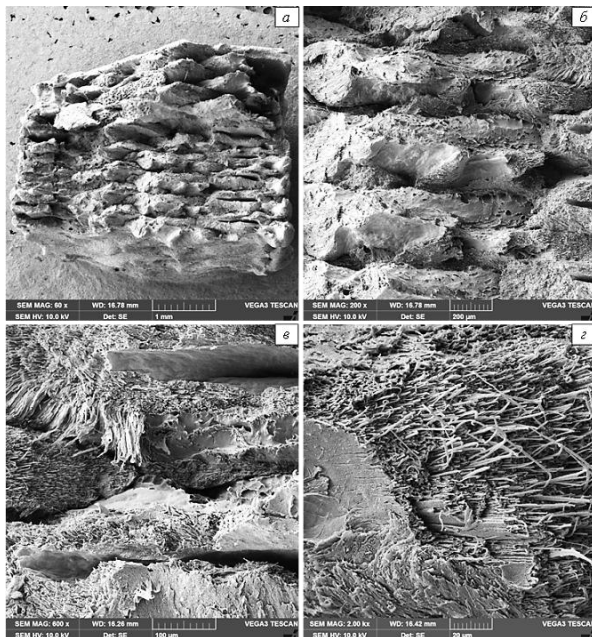


Рис. 11. Микроструктура зоны разрушения образца состава 20%ЖКП + 80%ПЭЭК (горизонтальная печать) после испытания: *а* – общий вид зоны разрушения; *б* – участок в зоне разрушения; *в* – граница между слоями; *г* – деформация матрицы

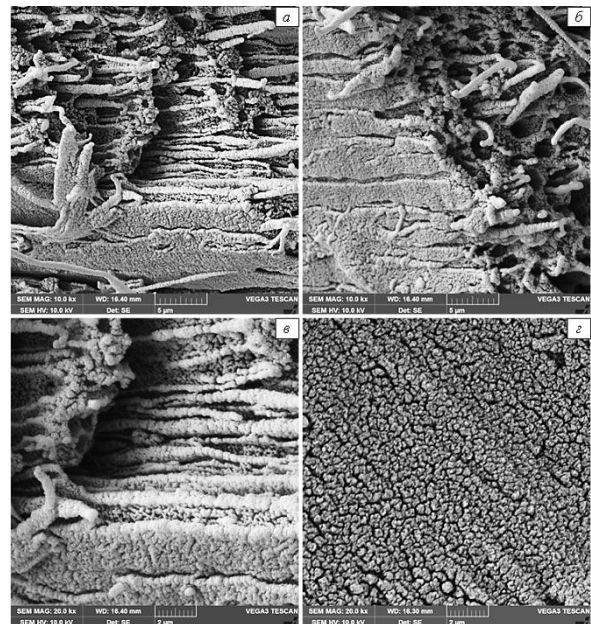


Рис. 12. Микроструктура зоны разрушения образца состава 20%ЖКП + 80%ПЭЭК (горизонтальная печать) после испытания: *а-в* – структура матрицы; *г* – микрофазовая структура матрицы

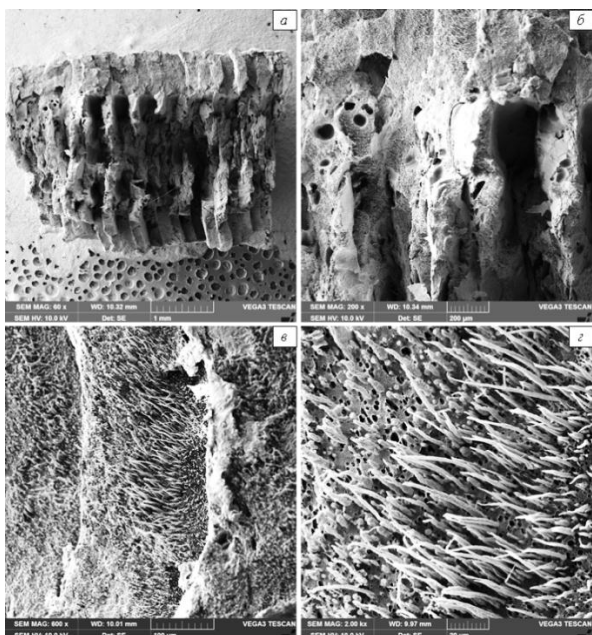


Рис. 13. Микроструктура зоны разрушения образца состава 20%ЖКП + 80%ПЭЭК (вертикальная печать) после испытания: *а* – общий вид зоны разрушения; *б* – участок в зоне разрушения; *в* – граница между слоями; *г* – деформация матрицы

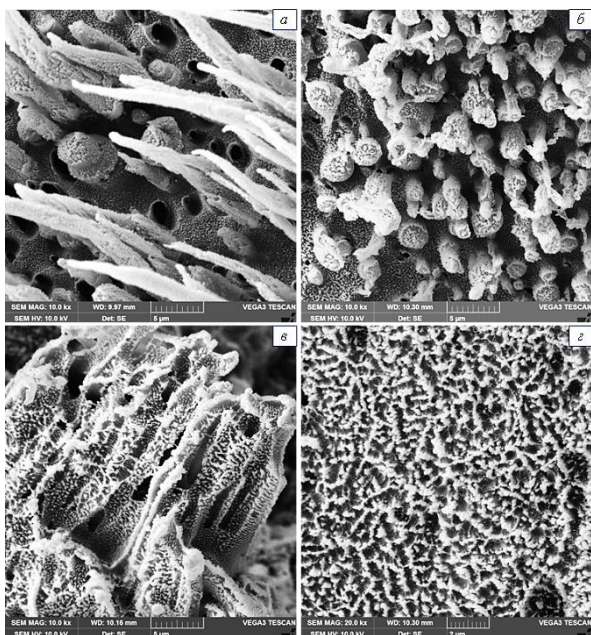


Рис. 14. Микроструктура зоны разрушения образца состава 20%ЖКП + 80%ПЭЭК (вертикальная печать) после испытания: *а-в* – деформация матрицы; *г* – микрофазовая структура матрицы

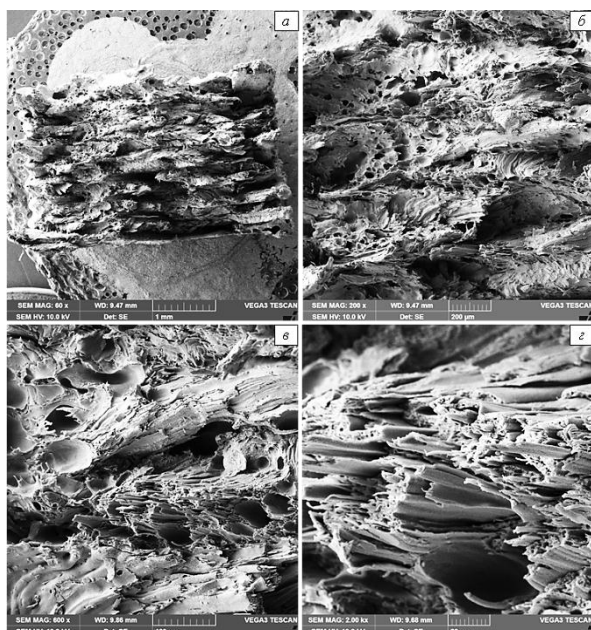


Рис. 15. Микроструктура зоны разрушения образца состава 40%ЖКП + 60%ПЭЭК (горизонтальная печать) после испытания: *а* – общий вид зоны разрушения; *б* – участок в зоне разрушения; *в* – граница между слоями; *г* – деформация матрицы

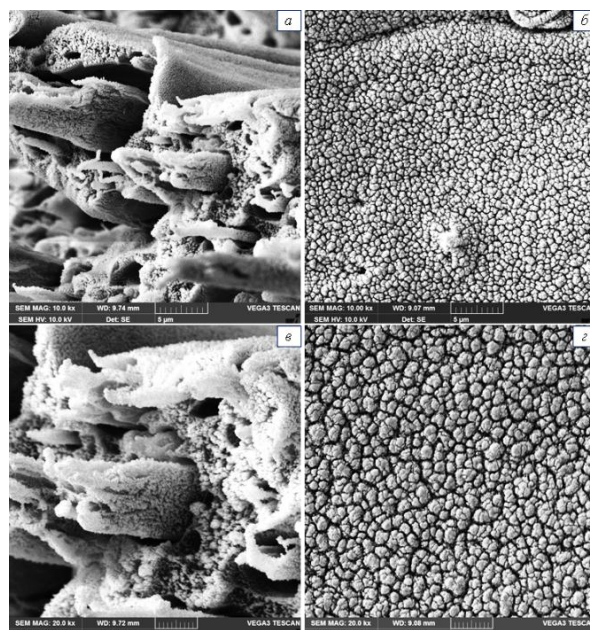


Рис. 16. Микроструктура зоны разрушения образца состава 40%ЖКП + 60%ПЭЭК (горизонтальная печать) после испытания: *а* – участок в зоне разрушения; *б*, *г* – микрофазовая структура матрицы; *в* – разрушенный участок

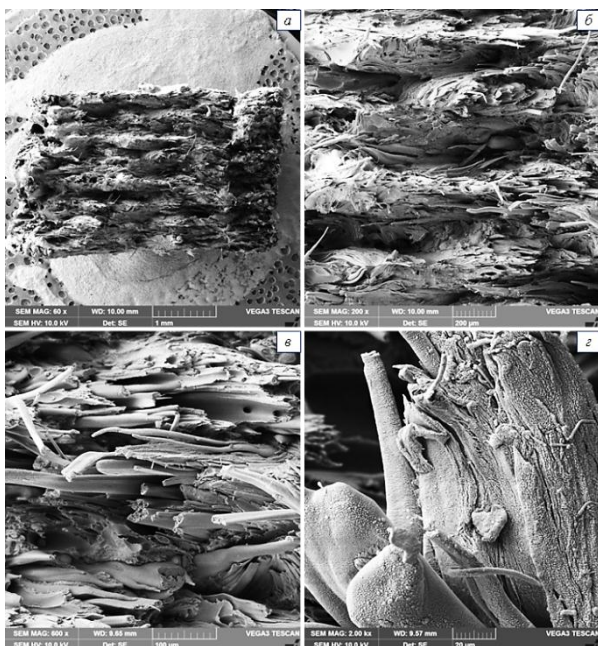


Рис. 17. Микроструктура зоны разрушения образца состава 60%ЖКП + 40%ПЭЭК (горизонтальная печать) после испытания: *а* – общий вид зоны разрушения; *б* – участок в зоне разрушения; *в* – граница между слоями; *г* – деформация матрицы

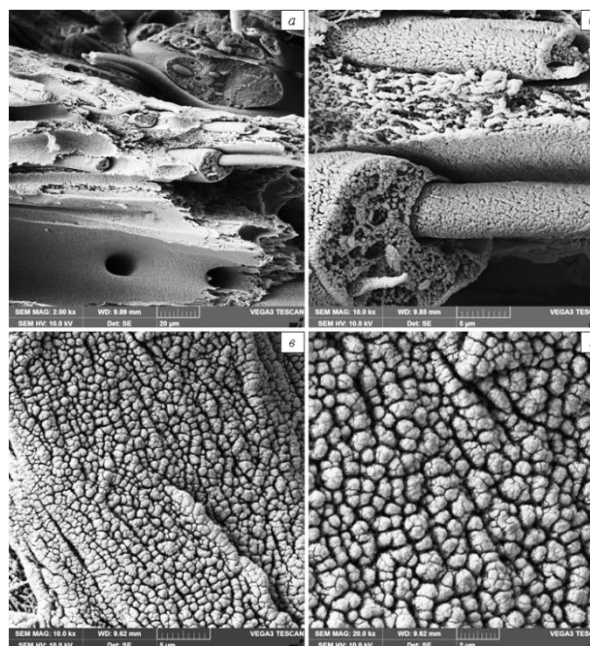


Рис. 18. Микроструктура зоны разрушения образца состава 60%ЖКП + 40%ПЭЭК (горизонтальная печать) после испытания: *а*, *б* – участок в зоне разрушения; *в*, *г* – микрофазовая структура матрицы

На микрофотографиях сколов образцов, напечатанных вертикально и горизонтально из композиционных филаментов составов 20%ЖКП + 80%ПЭЭК, 40%ЖКП + 60%ПЭЭК, 60%ЖКП + 40%ПЭЭК можно наблюдать фибриллярную структуру, которая отсутствует на образце 100%-ного ПЭЭК. Это доказывает, что в процессе изготовления филаментов мезофаза сохраняется при печати. При этом диаметр и количество фибрилл прямо пропорциональны концентрации ЖКП. При концентрации 20 % (по массе) ЖК-фибриллы равномерно расположены по объему слоя, при больших концентрациях из них образуются жгуты. На самих фибриллах при этом можно наблюдать фазу ПЭЭК, которая при концентрации 20 % (по массе) ЖКП «обволакивает» фибриллы тонким слоем, а при концентрации 60 % (по массе) ЖКП покрывает фибриллы толстым слоем, образуя коаксиальную структуру.

Как видно из приведенных данных, морфология излома лопаток существенно различается. Морфологически нить расплава образца, полученного способом горизонтальной печати, имеет коаксиальное строение, неоднородна по диаметру, имеет четко выраженную границу между внутренним и внешним слоями. Нить расплава детали, изготовленной способом вертикальной печати, является более однородной по диаметру. Изменение характера излома наблюдается лишь в узком интервале вблизи границы нитей. Наблюдаемые различия в морфологии излома образцов можно связать с различием структур полимерной матрицы для образцов, полученных разными способами. Из приведенных результатов видно, что микроструктура полимерной матрицы в центральной части нити в обоих вариантах печати отличается от структуры слоя на границах нитей. В приграничном слое матрица становится более плотной. Размер областей с низким межмолекулярным взаимодействием, которые поддаются ионному травлению в первую очередь (темные области микрофотографии), уменьшается. При этом размер измененной зоны для случая вертикальной печати оказывается намного меньше по сравнению со способом горизонтальной печати.

На основании данных микроскопического исследования можно предположить, что охлажденная нить расплава ПЭЭК, полученная в ходе изготовления, а также FDM-процесса, имеет коаксиальное строение. При этом внутренний и внешний слои имеют различную микроструктуру, а следовательно, различные свойства: внешний слой является более плотным и, вероятно, более жестким по сравнению с внутренним слоем. Расстекловывание аморфной части ПЭЭК незначительно влияет на вязкоупругие свойства нити материала, экструдированного и остывшего в процессе печати. Данный результат можно объяснить, если предположить, что упругие свойства внешнего слоя выше, чем у внутреннего, а его расстекловывание происходит при более высокой температуре (вероятно, в температурном диапазоне 300–350 °C). При добавлении ЖК-полимера в концентрации 20 % (по массе) низкотемпературный релаксационный переход имеет наиболее выраженный характер, что может свидетельствовать об изменении структуры наружного слоя охлажденной нити расплава в присутствии молекул ЖКП, которые, как следует из анализа микрофотографий, в нем локализованы (рис. 13 и 14, рис. 19, *д-жс*). Дальнейшее увеличение доли ЖКП в композиции приводит к полному изменению коаксиальной структуры охлажденной нити, что позволяет предположить протекание процесса инверсии фаз ПЭЭК и ЖКП, что, однако, негативно сказывается на прочностных характеристиках получаемых образцов из филаментов с высоким содержанием ЖКП-фазы, по-видимому, из-за низкой межслоевой адгезии и когезии ориентированных фибриллярных структур.

На рис. 19 приведены термограммы фрагментов образцов лопаток при горизонтальной печати и напечатанных «ребром», изготовленных из филаментов различных составов: 100%-ный ПЭЭК, 20%ЖКП + 80%ПЭЭК, 40%ЖКП + 60%ПЭЭК и 60%ЖКП + 40%ПЭЭК.

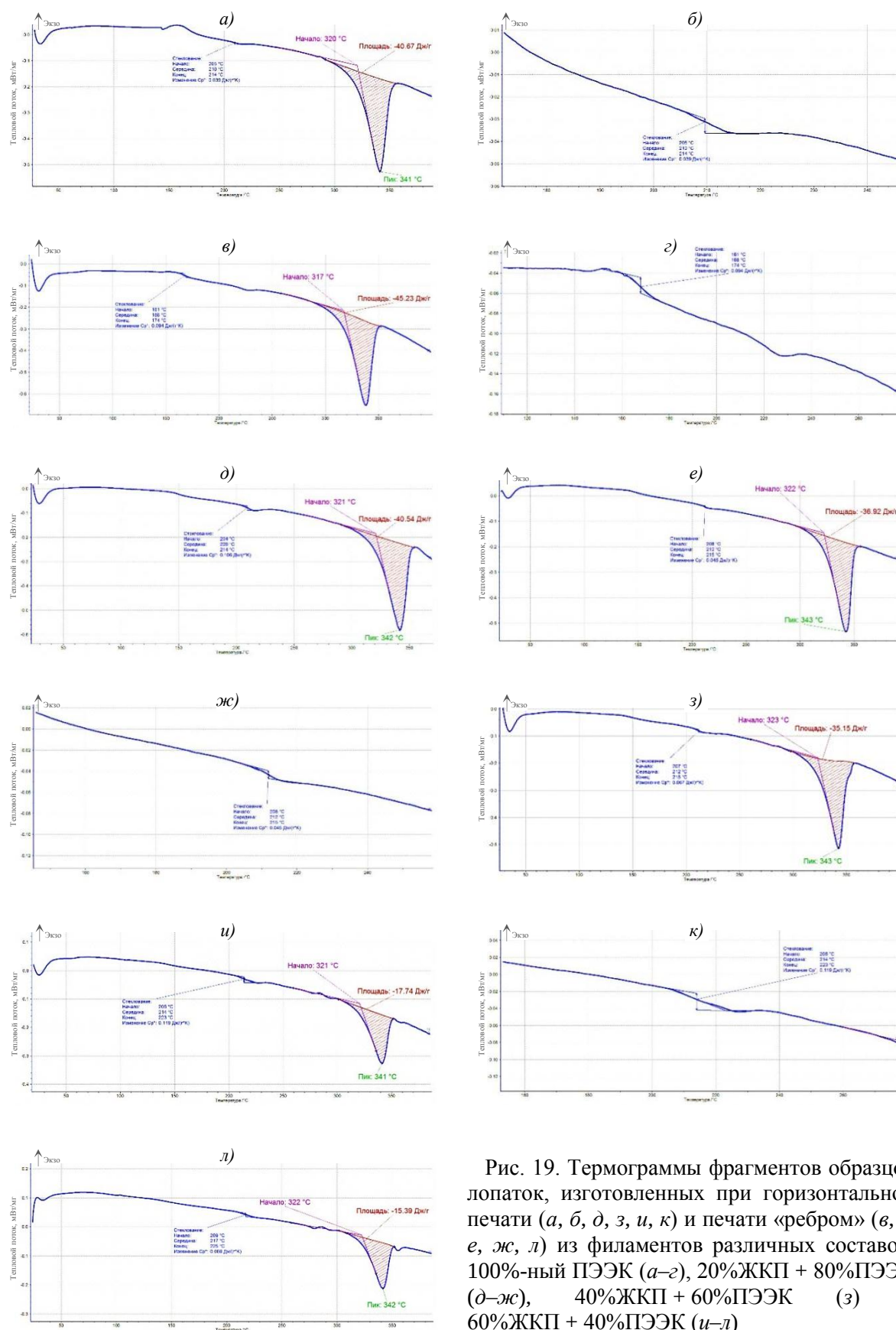


Рис. 19. Термограммы фрагментов образцов лопаток, изготовленных при горизонтальной печати (а, б, д, з, и, к) и печати «ребром» (в, г, е, ж, л) из филаментов различных составов: 100%-ный ПЭЭК (а–г), 20%ЖКП + 80%ПЭЭК (д–ж), 40%ЖКП + 60%ПЭЭК (з) и 60%ЖКП + 40%ПЭЭК (и–л)

На основе полученных термограмм фрагментов лопаток, напечатанных «ребром» и вертикально, можно сделать следующие выводы. В образцах, напечатанных из филамента состава 100%-ный ПЭЭК, степень кристалличности больше в образцах, напечатанных вертикально. В образцах, содержащих ЖКП, корреляция обратная, т. е. степень кристалличности меньше в образцах, напечатанных «ребром». При этом с увеличением концентрации ЖК-полимера, степень кристалличности снижалась с 31 % при 20 % (по массе) ЖКП до 13 % при 60 % (по массе) ЖКП.

Следует отметить, что на всех напечатанных образцах присутствует переход в области температуры 210 °С. Низкотемпературный релаксационный переход при этом у модифицированных ЖК-образцов не изменяется и находится в области температуры 150 °С, в то время как у образца на основе 100%-ного ПЭЭК он смещается в область более высоких температур – до 168 °С.

Заключения

Наиболее стабильная печать наблюдалась на двух составах композиционного филамента: 20%ЖКП + 80%ПЭЭК и 60%ЖКП + 40%ПЭЭК.

Наилучшие результаты физико-механических испытаний «горизонтальных» образцов лопаток получены на составе 20%ЖКП + 80%ПЭЭК – прочность при разрыве 63 МПа, модуль упругости при растяжении 2,6 ГПа, относительное удлинение 3,8 %.

Наибольшую прочность межслоевой адгезии вдоль оси Z (по результатам испытаний лопаток, напечатанных «ребром») показал состав 20%ЖКП + 80%ПЭЭК. Полученные результаты выше референсных (от 13 до 37 %) в части прочности при разрыве. При повышенной температуре испытаний 150 °С на разрыв образцы сохранили >50 % свойств в части прочности.

Образцы, полученные из композиционного состава 20%ЖКП + 80%ПЭЭК, показали более высокие значения прочности на изгиб с квотами превосходства по сравнению с образцами, изготовленными из 100%-ного ПЭЭК, – от 7 до 11 %.

Полученные органические композиционные филаменты имеют различную степень межслоевой адгезии и когезии при печати расплавом нити. Это подтверждается механическими свойствами полученных образцов-свидетелей. По-видимому, механические показатели (особенно для испытаний при изгибе образцов, напечатанных «ребром») коррелируют с низко- и среднетемпературными релаксационными переходами, которые, в свою очередь, определяют межслоевое взаимодействие между нитью расплава и уже отвержденным («напечатанным») слоем.

Благодарности

Авторы выражают благодарность сотрудникам НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ Е.В. Куршеву, С.Л. Лонскому, Г.Б. Эльдяевой, А.Г. Загоре, за проведенные микроструктурные и теплофизические исследования.

Работа выполнена при поддержке РНФ соглашение № 22-23-01167 от 11.01.2022.

Список источников

1. Каблов Е.Н., Кондрашов С.В., Мельников А.А., Павленко С.А., Гусева М.А., Пыхтин А.А., Ларионов С.А. Исследование влияния теплового режима FDM-печати на структурирование и коробление образцов полиэтилена // Труды ВИАМ. 2021. № 7 (101). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 18.08.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-7-48-58.

2. Пыхтин А.А., Сорокин А.Е., Ларионов С.А., Лонский С.Л. Исследование влияния нековалентных модификаторов на структуру и свойства полимерных филаментов для FDM-печати на основе АБС-пластика и углеродных наночастиц // Труды ВИАМ. 2021. № 10 (104). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 18.08.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-10-36-44.
3. Кирин Б.С., Лонский С.Л., Петрова Г.Н., Сорокин А.Е. Материалы для 3D-печати на основе полиэфирэфиркетонов // Труды ВИАМ. 2019. № 4 (76). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 18.08.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-4-21-29.
4. Кирин Б.С., Кузнецова К.Р., Петрова Г.Н., Сорокин А.Е. Сравнительный анализ свойств полиэфирэфиркетонов отечественного и зарубежного производства // Труды ВИАМ. 2018. № 5 (65). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 18.08.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-5-34-43.
5. Sikder P., Challa B.T., Gummadi S.K. A comprehensive analysis on the processing-structure-property relationships of FDM-based 3-D printed polyetheretherketone (PEEK) structures // Materialia. 2022. Vol. 22. P. 101427.
6. Dua R., Rashad Z., Spears J., Dunn G., Maxwell M. Applications of 3D-Printed PEEK via Fused Filament Fabrication: A Systematic Review // Polymers. 2021. Vol. 13. P. 4046.
7. Rinaldi M., Cecchini F., Pigliaru L. et al. Additive Manufacturing of Polyether Ether Ketone (PEEK) for Space Applications: A Nanosat Polymeric Structure // Polymers. 2021. Vol. 13. P. 11.
8. Rinaldi M., Ghidini T., Cecchini F. et al. Additive layer manufacturing of poly (ether ether ketone) via FDM // Composites Part B. 2018. Vol. 145. P. 162–172.
9. Li Y., Lou Y. Tensile and Bending Strength Improvements in PEEK Parts Using Fused Deposition Modelling 3D Printing Considering Multi-Factor Coupling // Polymers. 2020. Vol.12 (11). P. 2497.
10. Gonçalves J., Lima P., Krause B. et al. Electrically conductive polyetheretherketone nanocomposite filaments: From production to fused deposition modeling // Polymers. 2018. Vol. 10. P. 925.
11. Aysha M. A futuristic reality: 3D printed SpaceX helmets // 3DNatives. URL: <https://www.3dnatives.com/en/3d-printed-spacex-helmets-090620206/> (дата обращения: 18.08.2023).
12. Steers S. 3D printing: The future of space construction? // Construction Digital. URL: <https://constructiondigital.com/epc/3d-printing-future-space-construction> (дата обращения: 18.08.2023).
13. Reuters T. Boeing's new spacecraft to use more than 600 3D-printed parts // CBC News. URL: <https://www.cbc.ca/news/science/boeing-new-spacecraft-3d-parts-1.3966358> (дата обращения: 18.08.2023).
14. Pearson A. Stratasys additive manufacturing chosen by Airbus to produce 3D printed flight parts // Stratasys Blog. March 24 2020. URL: <https://www.stratasys.com/en/resources/blog/airbus-3d-printing/> (дата обращения: 18.08.2023).
15. Tyrer-Jones A. Finnair upgrades its Airbus A320 fleet with new 3D printed components // 3D printing industry. URL: <https://3dprintingindustry.com/news/finnair-upgrades-its-airbus-a320-fleet-with-new-3d-printed-components-230516/> (дата обращения: 18.08.2023).
16. Materialise. Why Airbus Qualified A New 3D Printing Material In 2021: Flame-Retardant PA // Aviation Week. URL: <https://aviationweek.com/mro/why-airbus-qualified-new-3d-printing-material-2021-flame-retardant-pa> (дата обращения: 18.08.2023).
17. Case study. Airbus Gets on Board with 3D Printing // Materialise. URL: <https://www.materialise.com/en/inspiration/cases/airbus-3d-printing> (дата обращения: 18.08.2023).
18. Davies S. Boeing qualifies Stratasys Antero 800NA 3D printing thermoplastic material // TCT Magazine. 29 October 2020. URL: <https://www.tctmagazine.com/additive-manufacturing-3d-printing-news/boeing-qualifies-stratasys-antero-800na-3d-printing-material/> (дата обращения: 18.08.2023).
19. Autonomous Manufacturing. Application Spotlight: 3D Printing for Aircraft Cabins // AMFG. URL: <https://amfg.ai/2020/07/27/application-spotlight-3d-printing-for-aircraft-cabins/> (дата обращения: 18.08.2023).

20. Torke N. Materialise to Deliver 3D-Printed, Flight-Ready Plastic Parts for Airbus // Materialise. URL: <https://www.materialise.com/en/news/press-releases/3d-printed-flight-ready-plastic-parts-for-airbus> (дата обращения: 18.08.2023).
21. Gardner J.M., Stelter C.J., Yashin E.A., Siochi E.J. High Temperature Thermoplastic Additive Manufacturing Using Low-Cost, OpenSource Hardware // NASA Report № NASA-TM-2016-219344. 2016. URL: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20170000214/downloads/20170000214.pdf> (дата обращения: 18.08.2023).
22. Prater T.J., Bean Q.A., Beshears R.D., Rolin T.D., Werkheiser N.J., Ordonez E.A., Ryan R.M., Ledbetter III F.E. Summary Report on Phase I Results From the 3D Printing in Zero-G Technology Demonstration Mission, Volume I // NASA Report № NASA/TP—2016—219101. 2016. URL: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20160008972/downloads/20160008972.pdf> (дата обращения: 18.08.2023).
23. Gaskill M. Solving the Challenges of Long Duration Space Flight with 3D Printing // NASA website. URL: <https://www.nasa.gov/missions/station/solving-the-challenges-of-long-duration-space-flight-with-3d-printing/> (дата обращения: 18.08.2023).
24. Caliendo H. Mercedes-Benz Turns to 3D Printing for Plastic Spare Parts // Additive Manufacturing. URL: [https://www.additivemanufacturing.media/articles/mercedes-benz-turns-to-3d-printing-for-plastic-spare-parts-\(2\)](https://www.additivemanufacturing.media/articles/mercedes-benz-turns-to-3d-printing-for-plastic-spare-parts-(2)) (дата обращения: 18.08.2023).
25. Griffiths L. Audi Sport reduces design time by 90% with automation of 3D printed jigs and fixtures // TCT Magazine. URL: <https://www.tctmagazine.com/additive-manufacturing-3d-printing-news/software-and-simulation-news/audi-sport-reduces-design-time-by-90-with-automated-design-o/> (дата обращения: 18.08.2023).
26. Camillo J. Bentley Motors Drives its Future Car Design With 3D Printing // Assembly Magazine. URL: <https://www.assemblymag.com/articles/95439-bentley-motors-drives-its-future-car-design-with-3d-printing> (дата обращения: 18.08.2023).
27. Farish M. Bentley increases use of additive manufacturing // AMS magazines. URL: <https://www.automotivemanufacturingsolutions.com/oems/bentley-increases-use-of-additive-manufacturing/43137.article> (дата обращения: 18.08.2023).
28. Lamborghini и Stratasys: история любви на высокой скорости // Новости 3D Today. URL: <https://3dtoday.ru/blogs/news3dtoday/lamborghini-and-stratasys-a-love-story-at-high-speed> (дата обращения: 18.08.2023).
29. Five Ways 3D Printing Is Transforming the Automotive Industry // Stratasys. URL: https://www.stratasys.com/contentassets/e85c0f5f58be4be1a4e12ceac237e026/wp_fdm_fivewaysauto_a4_0516-web.pdf?v=48fd7e (дата обращения: 18.08.2023).
30. Lamborghini Accelerates and Perfects Automotive Engineering with Stratasys 3D Printed Prototypes and Track-Ready Parts // Stratasys corporate blog. URL: <http://blog.stratasys.com/> (дата обращения: 18.08.2023).
31. 3D Printed Lamborghini: Next-Gen Innovations In Automotive Design // Petropoulos G. URL: <https://www.inorigin.eu/3d-printed-lamborghini/> (дата обращения: 18.08.2023).
32. Stratasys. UPSA spurs pharmaceutical manufacturing innovation with 3D printing // Stratasys Case Study. URL: <https://www.stratasys.com/en/resources/case-studies/upsa/> (дата обращения: 18.08.2023).
33. How UPSA realizes its return on investment by integrating 3D printing // 3D Adept Media. URL: <https://3dadept.com/stratasys-upsa-3d-printing/> (дата обращения: 18.08.2023).
34. Stratasys to test 3D printed materials on the moon // The Engineer. URL: <https://www.theengineer.co.uk/content/news/stratasys-to-test-3d-printed-materials-on-the-moon/> (дата обращения: 18.08.2023).
35. Boissonneault T. Marshall Aerospace and Defence using FDM 3D printing for flight-ready parts // Voxel Matters. URL: <https://www.voxelmatters.com/marshall-aerospace-defence-fdm-3d-printing/> (дата обращения: 18.08.2023).
36. Sevcik S. The Install Ready (FORM 1) Approach - AM Part Qual in Aviation, Part 1 // Aerospace & Defense | Technology, Strategy, Additive Manufacturing. URL: <https://www.linkedin.com/pulse/install-ready-form-1-approach-am-part-qual-aviation-scott-sevcik-k6pmmc> (дата обращения: 18.08.2023).

37. De Zeeuw E. Breaking the certification barrier in aerospace AM // *Aerospace Manufacturing and Design*. URL: <https://www.aerospacemanufacturinganddesign.com/article/breaking-the-certification-barrier-in-aerospace-am/> (дата обращения: 18.08.2023).
38. Stratasys. A Path to Certification // White paper. URL: <https://www.padtinc.com/blog2/wp-content/uploads/2019/12/Path-to-Certification-EN-A4-FDM-White-Paper.pdf> (дата обращения: 18.08.2023).
39. Banerjee S., Kar K.K. Introduction to Liquid Crystalline Polymers // *Polymers and Polymeric Composites: A Reference Series*. 2020. P. 1–26.
40. Wang X.-J., Zhou Q.-F. Liquid Crystalline Polymers. World Scientific Publishing Company, 2004. 388 p.
41. Thakur V.K., Kessler M.R. Liquid Crystalline Polymers. Springer, 2016. Vol. 1: Structure and Chemistry. 626 p.
42. Дебердеев Т.Р., Ахметшина А.И., Каримова Л.К., Игнатьева Э.К., Дебердеев Р.Я., Берлин А.А. Термостойкие полимерные материалы на основе жидкокристаллических соединений // *Высокомолекулярные соединения. Сер.: С*. 2020. Т. 62. № 2. С. 145–165. DOI: 10.31857/S230811472002003X.

References

1. Kablov E.N., Kondrashov S.V., Melnikov A.A., Pavlenko S.A., Guseva M.A., Pykhtin A.A., Larionov S.A. Investigation of the influence of the thermal regime of FDM printing on the structuring and warping of polyethylene samples. *Trudy VIAM*, 2021, no. 7 (101), paper no. 06. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 18, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-7-48-58.
2. Pykhtin A.A., Sorokin A.E., Larionov S.A., Lonskii S.L. Study of the influence of non-covalent modifiers on the structure and properties of polymer filaments for FDM-printing based on ABS-plastic and carbon nanoparticles. *Trudy VIAM*, 2021, no. 10 (104), paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 18, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-10-36-44.
3. Kirin B.S., Lonskii S.L., Petrova G.N., Sorokin A.E. Materials for the 3D-printing on the basis of polyetheretherketones. *Trudy VIAM*, 2019, no. 4 (76), paper no. 03. Available at: <http://viam-works.ru> (accessed: August 18, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-4-21-29.
4. Kirin B.S., Kuznetsova K.R., Petrova G.N., Sorokin A.E. Comparative analysis of properties of polyetheretherketones of domestic and foreign production. *Trudy VIAM*, 2018, no. 5 (65), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 18, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-5-34-43.
5. Sikder P., Challa B.T., Gummadi S.K. A comprehensive analysis on the processing-structure-property relationships of FDM-based 3-D printed polyetheretherketone (PEEK) structures. *Materialia*. 2022, vol. 22, p. 101427.
6. Dua R., Rashad Z., Spears J., Dunn G., Maxwell M. Applications of 3D-Printed PEEK via Fused Filament Fabrication: A Systematic Review. *Polymers*, 2021, vol. 13, p. 4046.
7. Rinaldi M., Cecchini F., Pigliaru L., Ghidini T., Lumaca F., Nanni F. Additive Manufacturing of Polyether Ether Ketone (PEEK) for Space Applications: A Nanosat Polymeric Structure. *Polymers*, 2021, vol. 13, p. 11.
8. Rinaldi M., Ghidini T., Cecchini F., Brandao A., Nanni F. Additive layer manufacturing of poly (ether ether ketone) via FDM. *Composites Part B*. 2018, vol. 145, pp. 162–172.
9. Li Y., Lou Y. Tensile and Bending Strength Improvements in PEEK Parts Using Fused Deposition Modelling 3D Printing Considering Multi-Factor Coupling. *Polymers*, 2020, vol. 12 (11), p. 2497.
10. Gonçalves J., Lima P., Krause B. et al. Electrically conductive polyetheretherketone nanocomposite filaments: From production to fused deposition modeling. *Polymers*, 2018, vol. 10, p. 925.
11. Aysha M. A futuristic reality: 3D printed SpaceX helmets. 3DNatives. Available at: <https://www.3dnatives.com/en/3d-printed-spacex-helmets-090620206/> (accessed: August 18, 2023).
12. Steers S. 3D printing: The future of space construction? *Construction Digital*. Available at: <https://constructiondigital.com/epc/3d-printing-future-space-construction> (accessed: August 18, 2023).

13. Reuters T. Boeing's new spacecraft to use more than 600 3D-printed parts. CBC News. Available at: <https://www.cbc.ca/news/science/boeing-new-spacecraft-3d-parts-1.3966358> (accessed: August 18, 2023).
14. Pearson A. Stratasys additive manufacturing chosen by Airbus to produce 3D printed flight parts. Stratasys Blog. Available at: <https://www.stratasys.com/en/resources/blog/airbus-3d-printing/> (accessed: August 18, 2023).
15. Tyrer-Jones A. Finnair upgrades its Airbus A320 fleet with new 3D printed components. 3D printing industry. Available at: <https://3dprintingindustry.com/news/finnair-upgrades-its-airbus-a320-fleet-with-new-3d-printed-components-230516/> (accessed: August 18, 2023).
16. Materialise. Why Airbus Qualified A New 3D Printing Material In 2021: Flame-Retardant PA. Aviation Week. Available at: <https://aviationweek.com/mro/why-airbus-qualified-new-3d-printing-material-2021-flame-retardant-pa> (accessed: August 18, 2023).
17. Case study. Airbus Gets on Board with 3D Printing. Materialise. Available at: <https://www.materialise.com/en/inspiration/cases/airbus-3d-printing> (accessed: August 18, 2023).
18. Davies S. Boeing qualifies Stratasys Antero 800NA 3D printing thermoplastic material. TCT Magazine. Available at: <https://www.tctmagazine.com/additive-manufacturing-3d-printing-news/boeing-qualifies-stratasys-antero-800na-3d-printing-material/> (accessed: August 18, 2023).
19. Autonomous Manufacturing. Application Spotlight: 3D Printing for Aircraft Cabins. AMFG. Available at: <https://amfg.ai/2020/07/27/application-spotlight-3d-printing-for-aircraft-cabins/> (accessed: August 18, 2023).
20. Torke N. Materialise to Deliver 3D-Printed, Flight-Ready Plastic Parts for Airbus. Materialise. Available at: <https://www.materialise.com/en/news/press-releases/3d-printed-flight-ready-plastic-parts-for-airbus> (accessed: August 18, 2023).
21. Gardner J.M., Stelter C.J., Yashin E.A., Siochi E.J. High Temperature Thermoplastic Additive Manufacturing Using Low-Cost, OpenSource Hardware. NASA Report № NASA-TM-2016-219344. Available at: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20170000214/downloads/20170000214.pdf> (accessed: August 18, 2023).
22. Prater T.J., Bean Q.A., Beshears R.D. et al. Summary Report on Phase I Results From the 3D Printing in Zero-G Technology Demonstration Mission, Volume I // NASA Report № NASA/TP—2016—219101. Available at: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20160008972/downloads/20160008972.pdf> (accessed: August 18, 2023).
23. Gaskill M. Solving the Challenges of Long Duration Space Flight with 3D Printing. NASA website. Available at: <https://www.nasa.gov/missions/station/solving-the-challenges-of-long-duration-space-flight-with-3d-printing/> (accessed: August 18, 2023).
24. Caliendo H. Mercedes-Benz Turns to 3D Printing for Plastic Spare Parts. Additive Manufacturing. Available at: [https://www.additivemanufacturing.media/articles/mercedes-benz-turns-to-3d-printing-for-plastic-spare-parts-\(2\)](https://www.additivemanufacturing.media/articles/mercedes-benz-turns-to-3d-printing-for-plastic-spare-parts-(2)) (accessed: August 18, 2023).
25. Griffiths L. Audi Sport reduces design time by 90% with automation of 3D printed jigs and fixtures. TCT Magazine. Available at: <https://www.tctmagazine.com/additive-manufacturing-3d-printing-news/software-and-simulation-news/audi-sport-reduces-design-time-by-90-with-automated-design-o/> (accessed: August 18, 2023).
26. Camillo J. Bentley Motors Drives its Future Car Design With 3D Printing. Assembly Magazine. Available at: <https://www.assemblymag.com/articles/95439-bentley-motors-drives-its-future-car-design-with-3d-printing> (accessed: August 18, 2023).
27. Farish M. Bentley increases use of additive manufacturing. AMS magazines. Available at: <https://www.automotivemanufacturingsolutions.com/oems/bentley-increases-use-of-additive-manufacturing/43137.article> (accessed: August 18, 2023).
28. Lamborghini и Stratasys: история любви на высокой скорости. Новости 3D Today. Available at: <https://3dtoday.ru/blogs/news3dtoday/lamborghini-and-stratasys-a-love-story-at-high-speed> (accessed: August 18, 2023).
29. Five Ways 3D Printing Is Transforming the Automotive Industry. Stratasys. Available at: https://www.stratasys.com/contentassets/e85c0f5f58be4be1a4e12ceac237e026/wp_fdm_fivewaysa_uto_a4_0516-web.pdf?v=48fd7e (accessed: August 18, 2023).

30. Lamborghini Accelerates and Perfects Automotive Engineering with Stratasys 3D Printed Prototypes and Track-Ready Parts. Statasys corporate blog. Available at: <http://blog.stratasys.com/> (accessed: August 18, 2023).
31. 3D Printed Lamborghini: Next-Gen Innovations In Automotive Design. Petropoulos G. Available at: <https://www.inorigin.eu/3d-printed-lamborghini/> (accessed: August 18, 2023).
32. Stratasys. UPSA spurs pharmaceutical manufacturing innovation with 3D printing. Stratasys Case Study. Available at: <https://www.stratasys.com/en/resources/case-studies/upsa/> (accessed: August 18, 2023).
33. How UPSA realizes its return on investment by integrating 3D printing. 3D Adept Media. Available at: <https://3dadept.com/stratasys-upsa-3d-printing/> (accessed: August 18, 2023).
34. Stratasys to test 3D printed materials on the moon. The Engineer. Available at: <https://www.theengineer.co.uk/content/news/stratasys-to-test-3d-printed-materials-on-the-moon/> (accessed: August 18, 2023).
35. Boissonneault T. Marshall Aerospace and Defence using FDM 3D printing for flight-ready parts. Voxel Matters. Available at: <https://www.voxelmatters.com/marshall-aerospace-defence-fdm-3d-printing/> (accessed: August 18, 2023).
36. Sevcik S. The Install Ready (FORM 1) Approach - AM Part Qual in Aviation, Part 1. Aerospace & Defense | Technology, Strategy, Additive Manufacturing. Available at: <https://www.linkedin.com/pulse/install-ready-form-1-approach-am-part-qual-aviation-scott-sevcik-k6pmc> (accessed: August 18, 2023).
37. De Zeeuw E. Breaking the certification barrier in aerospace AM. Aerospace Manufacturing and Design. Available at: <https://www.aerospacemanufacturinganddesign.com/article/breaking-the-certification-barrier-in-aerospace-am/> (accessed: August 18, 2023).
38. Stratasys. A Path to Certification. White paper, 2019, pp. 1–9. Available at: <https://www.padtinc.com/blog2/wp-content/uploads/2019/12/Path-to-Certification-EN-A4-FDM-White-Paper.pdf> (accessed: August 18, 2023).
39. Banerjee S., Kar K.K. Introduction to Liquid Crystalline Polymers. *Polymers and Polymeric Composites: A Reference Series*, 2020, pp. 1–26.
40. Wang X.-J., Zhou Q.-F. *Liquid Crystalline Polymers*. World Scientific Publishing Company, 2004, 388 p.
41. Thakur V.K., Kessler M.R. *Liquid Crystalline Polymers*. Springer, 2016, vol. 1: Structure and Chemistry, 626 p.
42. Deberdeev T.R., Akhmetshina A.I., Karimova L.K. et al. Heat-resistant polymer materials based on liquid crystalline compounds. *Vysokomolekulyarnyye soyedineniya. Ser.: C*, 2020, vol. 62, no. 2, pp. 145–165. DOI: 10.31857/S230811472002003X.

Информация об авторах

Гуров Дмитрий Александрович, заместитель начальника лаборатории по науке, к.ф.-м.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Цапенко Андрей Николаевич, техник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Павлюкович Надежда Геннадьевна, ведущий научный сотрудник, к.х.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Dmitry A. Gurov, Deputy Head of Laboratory of Science, Candidate of Sciences (Phys. & Math.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Andrey N. Tsapenko, Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Nadezhda G. Pavlukovich, Leading Researcher, Candidate of Sciences (Chem.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 01.12.2023; одобрена и принята к публикации после рецензирования 07.12.2023.
The article was submitted 01.12.2023; approved and accepted for publication after reviewing 07.12.2023.

Научная статья

УДК 629.7.023.22

DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-10-63-73

ПКМ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ СТЕКЛЯННЫХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ИНТЕРЬЕРА ВЕРТОЛЕТНОЙ ТЕХНИКИ

Е.Д. Колпачков¹, М.И. Вавилова¹, Е.А. Серкова¹, Э.Ю. Долгов¹, В.В. Антипов¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. Приведены результаты разработки и исследования стеклопластика конструкционного назначения для изготовления элементов конструкции интерьера вертолетной техники. Проведен сравнительный анализ с ранее разработанными и применяемыми материалами, в том числе с зарубежным аналогом. Показано, что разработанные материалы удовлетворяют современным требованиям по пожаробезопасности, а за счет использования эпоксидного расплавленного связующего обеспечивают повышенную технологичность и достижение высокого уровня упруго-прочностных характеристик. Продемонстрирована принципиальная возможность доведения материала до уровня удовлетворения требований в части пожаробезопасности, предъявляемых к материалам интерьера самолетов транспортной категории.

Ключевые слова: расплавленное эпоксидное связующее, полимерные композиционные материалы, стеклопластики, интерьерные материалы, трехслойные сотовые панели, интерьеры авиационной техники

Для цитирования: Колпачков Е.Д., Вавилова М.И., Серкова Е.А., Долгов Э.Ю., Антипов В.В. ПКМ нового поколения на основе стеклянных наполнителей для изготовления элементов интерьера вертолетной техники // Труды ВИАМ. 2024. № 10 (140). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-10-63-73.

Scientific article

NEW GENERATION PCM BASED ON GLASS FILLERS FOR THE MANUFACTURING OF INTERIOR ELEMENTS OF HELICOPTER EQUIPMENT

E.D. Kolpachkov¹, M.I. Vavilova¹, E.A. Serkova¹, E.Yu. Dolgov¹, V.V. Antipov¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. The results of the development and research of fiberglass for structural purposes for the manufacture of interior design elements of helicopters are presented. A comparative analysis was carried out with previously developed and used materials, including a foreign analogue. It is shown that the developed materials meet modern requirements for fire safety, and due to the use of an epoxy melt binder they provide increased manufacturability and achieve a high level of elastic and strength characteristics. The possibility of improving the developed material to meet the requirements in terms of fire safety imposed on the interior materials of aircraft of the transport category is shown.

Keywords: melt epoxy binder, polymer composite materials, fiberglass, interior materials, three-layer honeycomb panels, interiors of aviation equipment

For citation: Kolpachkov E.D., Vavilova M.I., Serkova E.A., Dolgov E.Yu., Antipov V.V. New generation PCM based on glass fillers for the manufacturing of interior elements of helicopter equipment. *Trudy VIAM*, 2024, no. 10 (140), paper no. 06. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-10-63-73.

Введение

Обеспечение постоянного роста комплекса тактико-технических характеристик (ТТХ) изделий авиационной техники невозможно только за счет конструкторских решений, во многом существенный рост эксплуатационных показателей летательных аппаратов зависит от материалов, на основе которых изготавливаются их конструкции. Поэтому только постоянное развитие материаловедения может обеспечивать возможность непрерывного совершенствования авиации и ракетостроения.

Помимо роста ТТХ авиационной техники одним из первоочередных является вопрос их безопасной эксплуатации, в особенности если это касается пассажирских перевозок. Применительно к интерьерным материалам самолетов транспортной категории требования и нормы по пожаробезопасности значительно усовершенствованы и в настоящее время оформлены в виде Норм летной годности – Часть 25 (НЛГ-25) (рис. 1).



Рис. 1. Требования Норм летной годности (НЛГ) к интерьерным материалам в конструкциях самолетов и вертолетной техники

С учетом представленных требований НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ к середине 2010-х гг. обеспечивал рынок полным перечнем полимерных композиционных материалов (ПКМ) для изготовления элементов конструкций интерьера любого летательного аппарата в соответствии с предъявляемыми требованиями по пожаробезопасности. Для гражданских легких самолетов, а также вертолетов всех категорий использовался негорючий стеклотекстолит марки СТ-69Н-14, который обеспечивал высокий уровень физико-механических свойств. Однако данный материал изготавливали на основе растворного связующего ЭДТ-69Н, что снижало контроль и безопасность при производстве препрега-полуфабриката, а также не позволяло обеспечить высокий уровень эксплуатационных характеристик из-за наличия в образцах ПКМ воздушных включений [1–15].

Для самолетов транспортной категории, подчиняющихся требованиям НЛГ-25 (ранее АП-25), разработаны фенолформальдегидные связующие и ПКМ на их основе. Из наиболее активно применяемых – стеклотекстолит марки ВПС-39П на основе связующего РС-Н, из которого получали образцы ПКМ, характеризующиеся как самозатухающие, с низким выделением дыма и тепла, что позволяло применять его для изготовления элементов интерьера самолетов Ил-96, Ту-204/214 и др. Однако в связи с тем, что связующее РС-Н являлось растворным, стеклотекстолит на его основе характеризовался низким уровнем стабильности характеристик и безопасности при производстве препрега, а из-за фенолформальдегидной природы связующего материал имел существенно более низкие физико-механические характеристики, в том числе в составе трехслойных конструкций интерьера.

В результате к 2022 г. отечественная авиационная отрасль имела интерьерные ПКМ, которые обеспечивали требования по пожаробезопасности, но отставали в части технологичности и уровня реализуемой прочности. В связи с этим, а также по запросам предприятий-разработчиков вертолетной техники в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ разработан современный комплекс материалов, необходимых для изготовления элементов вертолетной техники, к которой предъявляются требования по горючести в рамках НЛГ-29 и дымообразованию в рамках НЛГ-25. Для обеспечения требований по технологичности и уровню реализации прочности используемых наполнителей определен тип разрабатываемого связующего – расплавное эпоксидное. Требования к разрабатываемым ПКМ приведены в табл. 1.

Таблица 1

Требования к разрабатываемым материалам

Пожаробезопасность		Тип связующего
Горючесть	Дымообразование	
Соответствие требованиям НЛГ-29	Соответствие требованиям НЛГ-25	Расплавное эпоксидное

Тем не менее при разработке новых интерьерных материалов для вертолетной техники, прорабатывался вопрос доведения разрабатываемого комплекса материалов для применения в интерьерах самолетов транспортной категории.

В данной работе представлены результаты исследования нового расплавного эпоксидного связующего и свойства полученных стеклопластиков в части физико-механических характеристик и характеристик пожаробезопасности. Показаны также результаты исследования возможности доработки материала до соответствия требованиям НЛГ-25 по всем характеристикам пожаробезопасности.

Материалы и методы

В качестве исследуемых материалов использовали стеклопластики на основе двух композиций расплавного эпоксидного связующего и стеклянной ткани Т-10-14.

Методом дифференциальной сканирующей калориметрии по ГОСТ Р 55135–2012 определена температура стеклования.

Массовые доли летучих веществ и связующего в стеклопластике определены по ГОСТ 22456–77 и ГОСТ Р 56682–2015 соответственно.

Значения предела прочности и модуля упругости при растяжении получены по ГОСТ Р 56785–2015 при температуре 23 °С.

Определены характеристики пожаробезопасности стеклопластиков: горючесть – по ГОСТ 57924–2017, дымообразование – по ГОСТ 24632–81, тепловыделение – по НЛГ-25 (Приложение F, Часть IV).

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Результаты и обсуждение

Для материалов, применяемых в интерьерах вертолетной техники, на первом этапе получены экспериментальные образцы связующего и определена температура их стеклования, °С:

Композиция 1	117
Композиция 2	125

После совмещения экспериментальных композиций 1 и 2 связующего и стекляннй ткани Т-10-14 методом контактного формования, изготовлены экспериментальные образцы стеклопластиков (методом прессования) и исследован комплекс их свойств (табл. 3).

Таблица 2

Свойства стеклопластиков

Свойства	Значения свойств* для		
	композиции 1 + Т-10-14	композиции 2 + Т-10-14	стеклотекстолита СТ-69Н
Содержание связующего, % (по массе)	$\frac{26,4-26,6}{26,4}$	$\frac{29,9-32,2}{30,1}$	35±2
Предел прочности при растяжении по основе при температуре 23 °С, МПа	$\frac{628-656}{645}$	$\frac{584-719}{681}$	629
Модуль упругости при растяжении, ГПа	$\frac{30-32}{31}$	$\frac{30-32}{31,2}$	–
* В числителе – диапазон значений, в знаменателе – среднее значение.			

По результатам определения прочностных показателей установлено, что образцы стеклопластиков на основе экспериментальных композиций связующего имеют схожий уровень предела прочности при растяжении по сравнению со стеклотекстолитом марки СТ-69Н.

На следующем этапе проводили исследование горючести и дымообразования полученных стеклопластиков. Результаты испытаний стеклопластиков на основе экспериментальных композиций связующего приведены в табл. 3 и 4.

Таблица 3

Характеристики горючести стеклопластиков
на основе экспериментальных композиций связующего и ткани Т-10-14

Материал	Толщина образца, мм	Продолжи- тельность экспозиции в пламени горелки, с	Продолжи- тельность остаточного горения (тления), с	Длина обуг- ливания, мм	Продолжи- тельность горения ка- пель, с	Класси- фикация
Требования по НЛГ	–	60	Не более 15	Не более 152	Не более 3	Самозату- хающий
Композиция 1 + Т-10-14	1,9–2,0	60	Не более 9	Не более 53	Нет	
Композиция 2 + Т-10-14	1,9–2,0	60	Не более 11	Не более 65	Нет	

Таблица 4

**Характеристики дымообразования стеклопластиков
на основе экспериментальных композиций связующего и ткани Т-10-14**

Материал	Толщина образца, мм	Удельная оптическая плотность дыма D_4^*
Требования по НЛГ	–	Не более 200
Композиция 1 + Т-10-14	1,9–2,0	$\frac{158-196}{177}$
Композиция 2 + Т-10-14	1,9–2,0	$\frac{147-194}{170,4}$

* В числителе – диапазон значений, в знаменателе – среднее значение.

По результатам проведенных исследований характеристик пожаробезопасности установлено, что образцы стеклопластиков на основе экспериментальных композиций связующего обеспечивают соответствие требованиям НЛГ-29 и НЛГ-25 по дымообразованию. Однако на основе разброса значений предела прочности при растяжении, а также на основе результатов определения горючести принято решение – для дальнейших исследований использовать состав композиции 1.

С учетом выбранного состава разработана нормативная документация на изготовление и поставку связующего и препрега стеклопластика. Так, разработанному эпоксидному расплавному связующему присвоена марка ВС-77, а препрегу стеклопластика на его основе – ВПС-76, поставка которого осуществляется по ТУ 13.96.14-162-07545412–2024.

Для обеспечения широкого диапазона допустимых технологий переработки стеклопластика марки ВПС-76 определены реологические характеристики связующего в препреге и теплофизические характеристики препрега и выбраны технологические параметры формования стеклопластика методами вакуум-печного и вакуум-автоклавного формования, а также методом прямого прессования. Результаты исследования физических и прочностных характеристик, а также характеристик пожаробезопасности стеклопластика марки ВПС-76 представлены в табл. 5–7.

Таблица 5

**Физические и прочностные характеристики стеклопластика марки ВПС-76,
изготовленного по различным технологиям формования**

Свойства	Значения свойств* для стеклопластика, полученного		
	прямым прессованием	формованием	
		вакуум-печным	вакуум-автоклавным
Плотность стеклопластика, г/см ³	1,93	1,89	1,98
Содержание связующего, % (по массе)	27,3	29,7	29,4
Толщина монослоя, мм	0,22	0,23	0,22
Предел прочности при растяжении при температуре 23±2 °С, МПа (укладка 0°)	$\frac{730-760}{740}$	$\frac{639-765}{706}$	$\frac{717-753}{731}$
Модуль упругости при растяжении при температуре 23±2 °С, ГПа (укладка 0°)	$\frac{33,0-34,5}{33,7}$	$\frac{31,0-32,3}{31,5}$	$\frac{32,3-33,2}{32,8}$
Предел прочности при сжатии при температуре 23±2 °С, МПа (укладка 0°)	$\frac{455-600}{515}$	$\frac{430-580}{520}$	$\frac{455-520}{488}$
Предел прочности при межслойном сдвиге при температуре 23±2 °С, МПа (укладка 0°)	$\frac{61-72}{67}$	$\frac{66-68}{66}$	$\frac{77-80}{78}$
Температура стеклования, °С	139	122	123

* В числителе – диапазон значений, в знаменателе – среднее значение.

Таблица 6

**Характеристики горючести стеклопластика
марки ВПС-76, изготовленного по различным технологиям формования**

Технология формования	Толщина образца, мм	Продолжительность экспозиции в пламени горелки, с	Продолжительность остаточного горения (тления), с	Длина обугливания, мм	Продолжительность горения капель, с	Классификация материала
Требования по НЛГ	—	60	Не более 15	Не более 152	Не более 3	Самозатухающий
Прямое прессование	1,9–2,0	60	Не более 10	Не более 86	—	
Вакуум-печное						
Вакуум-автоклавное						

Таблица 7

**Характеристики дымообразования стеклопластика
марки ВПС-76, изготовленного по различным технологиям формования**

Технология формования	Толщина образца, мм	Удельная оптическая плотность дыма D_4
Требования по НЛГ	—	Не более 200
Прямое прессование	1,9–2,0	Не более 148
Вакуум-печное		
Вакуум-автоклавное		

По результатам, представленным в табл. 5–7, можно сделать вывод, что разработанный стеклопластик марки ВПС-76 перерабатывается по основным препреговым технологиям с обеспечением одинакового уровня свойств и отвечает требованиям НЛГ-29 по горючести и НЛГ-25 по дымообразованию.

На следующем этапе методом прямого прессования изготовлены трехслойные сотовые панели на основе препрега стеклопластика марки ВПС-76 и полимерного сотового заполнителя ПСП-1-2,5, в том числе с заделкой торцов сферопластиком марки ВПЗ-26, за единый цикл (рис. 2) и проведены испытания на горючесть и дымообразование, результаты которых приведены в табл. 8 и 9.



Рис. 2. Трехслойные сотовые панели на основе экспериментальной композиции связующего

Таблица 8

**Характеристики горючести трехслойных сотовых панелей
на основе экспериментальной композиции связующего**

Образец материала ВПС-76/ ПСП-1-2,5	Толщина образца, мм	Продолжитель- ность экспози- ции в пламени горелки, с	Продолжитель- ность остаточ- ного горения (тления), с	Длина обуглива- ния, мм	Продолжитель- ность горения капель, с	Класси- фикация материала
Требования по НЛГ	—	60	Не более 15	Не бо- лее 152	Не более 3	Самозату- хающий
Без заделки торцов	15,69	60	Не более 15	Не бо- лее 75	Нет	
С заделкой торцов сферо- пластиком	15,46	60	Не более 6	Не бо- лее 98	Нет	

Таблица 9

**Характеристики дымообразования трехслойных сотовых панелей
на основе экспериментальной композиции связующего**

на основе экспериментальной композиции связующего			
Образец материала ВПС-76/ ПСП-1-2,5	Толщина образца, мм	Режим испытания	Удельная оптическая плотность дыма D ₄ *
Требования по НЛГ	–	–	Не более 200
Без заделки торцов	15,69	Горение	<u>141–183</u> 162
		Пиролиз (тление)	141
С заделкой торцов сферопластиком	15,46	Горение	<u>364–365</u> 364,5
		Пиролиз (тление)	169
* В числителе – диапазон значений, в знаменателе – среднее значение.			

Трехслойные сотовые панели на основе композиции 1 (как с заделанными торцами, так и без заделки торцов сферопластиком) по горючести соответствуют требованиям НЛГ-29. Полученные трехслойные сотовые панели по классификации относятся к самозатухающим. По дымообразованию такие панели без заделки торцов имеют удельную оптическую плотность дыма не более 200: при горении 162, а при пиролизе 141. Образцы с заделанными торцами при пиролизе соответствуют требованиям НЛГ-25, их удельная оптическая плотность дыма при пиролизе составляет 169, а при горении 365, что не соответствует требованиям НЛГ-25. Следует отметить, что на практике трехслойные сотовые панели с заделанными торцами при испытаниях на пожаробезопасность не применяются. Данные испытания панелей с заделанными торцами проведены для определения максимальных показателей по дымообразованию и получения сравнительных характеристик.

С учетом полученных результатов, полностью отвечающих изначальным требованиям к разрабатываемому материалу, рассмотрена возможность доработки стеклопластика марки ВПС-76 с целью доведения уровня его характеристик до полного соответствия требованиям НЛГ-25 в части пожаробезопасности. Из научно-технических литературных данных известно, что ПКМ на основе эпоксидных связующих не способны обеспечивать тепловыделение в пределах, допускаемых авиационными регуляторами по всему миру, будь то FAR-25 или НЛГ-25, а именно: общее количество выделяющегося тепла – не более 65 (кВт·мин)/м² и пик тепловыделения – не более 65 кВт/м². В связи с этим наибольшее распространение как в РФ, так и за рубежом получили

материалы на основе фенолформальдегидных связующих. Однако уровень реализации прочности наполнителя и комплекс эксплуатационных свойств ПКМ, а также технологичность полуфабриката на эпоксидных связующих будут всегда превышать по аналогичным показателям материалы на основе фенолформальдегидных связующих.

С использованием разработанных материалов и минеральной добавки получены экспериментальные образцы стеклопластика марки ВПС-76 и исследованы их характеристики пожаробезопасности (табл. 10).

Таблица 10

**Характеристики пожаробезопасности экспериментального стеклопластика
марки ВПС-76, изготовленного с применением минеральной добавки,
в сравнении с материалами-аналогами**

Свойства	Норма для характеристики		Значения свойств* для материала			
			ВПС-76 с минеральной добавкой (2 мм)	ВПС-76 (2 мм)	ВПС-39П (0,9 мм)	HexPly 260 (~1 мм)
Горючесть						
Продолжитель- ность экспозиции в пламени горел- ки, с	60		60	60	60	—
Продолжитель- ность остаточного горения (тления), с	Не более 15		Не более 8	Не более 10	2	—
Длина обуглива- ния, мм	Не более 152		Не более 53	Не более 86	54	—
Продолжитель- ность горения капель, с	Не более 3		Нет	Нет	Нет	—
Классификация материала	Самозатухающий					—
Дымообразование						
Удельная оптиче- ская плотность дыма D ₄	Не бо- лее 200	Горе- ние	<u>45–81</u> 63	Не более 148	6	—
		Пиро- лиз	26		0	—
Тепловыделение						
Общее количе- ство тепла (кВт·мин)/м ²	Не более 65		<u>13–57</u> 34	<u>92–105</u> 95	<u>16–37</u> 26	35
Пик тепловыде- ления, кВт/м ²	Не более 65		<u>40–72</u> 52	<u>74–90</u> 84	<u>27–54</u> 40	43
* В числителе – диапазон значений, в знаменателе – среднее значение. Примечание. В скобках дана толщина образца.						

Полученные результаты демонстрируют возможность доработки состава препрегов на основе эпоксидного расплавленного связующего ВС-77 (в частности препрега стеклопластика марки ВПС-76) для их дальнейшего применения в интерьерах самолетов транспортной категории.

Заключения

По результатам проведенных исследований разработан состав препрега стеклопластика марки ВПС-76. Отработаны основные технологические параметры переработки разработанного препрега и исследован комплекс характеристик стеклопластика, изготовленного по различным технологиям.

Показано, что разработанный стеклопластик марки ВПС-76 способен перерабатываться по всем основным промышленным технологиям с обеспечением единого уровня физических и прочностных характеристик, а также характеристик пожаробезопасности.

На основе разработанных материалов изготовлены трехслойные сотовые панели и исследован уровень их характеристик пожаробезопасности. Показано, что разработанные материалы позволяют изготавливать интерьерные конструкции для вертолетной техники, к которым предъявляются требования по горючести (НЛГ-29) и дымообразованию (НЛГ-25).

Исследована возможность доработки составов разработанных материалов с целью полного соответствия требованиям НЛГ-25 по характеристикам пожаробезопасности. Показано, что при использовании минеральной добавки стеклопластик на основе эпоксидного расплавленного связующего способен обеспечить (помимо горючести и дымообразования) требования по тепловыделению.

Список источников

1. Алдошин С.М., Бадамшина Э.Р., Каблов Е.Н. Полимерные наноккомпозиты – новое поколение полимерных материалов с повышенными эксплуатационными характеристиками // Тез. докл. I Междунар. форума по нанотехнологиям «Роснанотех 08». М., 2008. С. 385–387.
2. Каблов Е.Н., Семенова Л.В., Петрова Г.Н., Ларионов С.А., Перфилова Д.Н. Полимерные композиционные материалы на термопластичной матрице // Известия высших учебных заведений. Сер.: Химия и химическая технология. 2016. Т. 59. № 10. С. 61–71.
3. Баранников А.А., Вешкин Е.А., Постнов В.И., Стрельников С.В. К вопросу производства панелей пола из ПКМ для летательных аппаратов (обзорная статья) // Известия Самарского научного центра РАН. 2017. № 4-2. С. 198–213.
4. Начаркина А.В., Зеленина И.В., Валуева М.И., Барботько С.Л. Пожаробезопасность высокотемпературных углепластиков авиационного назначения (обзор) // Труды ВИАМ. 2022. № 7 (113). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 29.08.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-7-134-150.
5. Курносов А.О., Соколов И.И., Мельников Д.А., Топунова Т.Э. Пожаробезопасные стеклопластики для интерьера пассажирских самолетов (обзор) // Труды ВИАМ. 2015. № 11. Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 29.08.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-11-7-7.
6. Серкова Е.А., Застрогина О.Б., Барботько С.Л. Исследование возможности использования новых экологически безопасных фосфорорганических антипиренов в составе связующих для пожаробезопасных материалов интерьера // Труды ВИАМ. 2019. № 2 (74). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 29.08.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-2-24-34.
7. Вешкин Е.А., Сатдинов Р.А., Баранников А.А. Современные материалы для салона самолета // Труды ВИАМ. 2021. № 9 (103). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 29.08.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-9-33-42.
8. Стрельников С.В., Петухов В.И., Постнов В.И., Швеи Н.И. Новые решения в технологии изготовления препрегов для панелей интерьера // Известия Самарского научного центра РАН. 2011. № 4-2. С. 498–507.
9. Сатдинов Р.А., Вешкин Е.А., Постнов В.И. Оценка воздействий климатических факторов на эксплуатационные свойства стеклопластика марки ВПС-42П/Т-64 // Труды ВИАМ. 2020. № 10 (92). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 29.08.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-10-21-29.

10. Барботько С.Л., Кириллов В.Н., Шуркова Е.Н. Оценка пожарной безопасности полимерных композиционных материалов авиационного назначения // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. № 3. С. 56–63.
11. Старцев В.О., Антипов В.В., Славин А.В., Горбовец М.А. Современные отечественные полимерные композиционные материалы для авиастроения (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 2 (71). Ст. 10. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 29.08.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
12. Сорокин А.Е., Иванов М.С., Сагомонова В.А. Термопластичные полимерные композиционные материалы на основе полиэфирэфиркетонов различных производителей // *Авиационные материалы и технологии*. 2022. № 1 (66). Ст. 04. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 29.08.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-41-50.
13. Ткачук А.И., Донецкий К.И., Терехов И.В., Караваев Р.Ю. Применение термореактивных связующих для изготовления полимерных композиционных материалов методами безавтоклавного формования // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 1 (62). Ст. 03. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 29.08.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-22-33.
14. Имамединов Э.Ш., Валуева М.И. Перспективные материалы: обзор работ в области сверхвысокомолекулярного полиэтилена. Часть 1 // *Авиационные материалы и технологии*. 2024. № 3. Ст. 06. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 29.08.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-3-69-80.
15. Имамединов Э.Ш., Валуева М.И. Композиционные материалы для поршневых двигателей (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 3 (60). С. 19–28. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-3-19-28.

References

1. Aldoshin S.M., Badamshina E.R., Kablov E.N. Polymer nanocomposites – a new generation of polymer materials with improved performance characteristics. *Reports of the 1st International Forum on Nanotechnology «Rosnanotech 08»*. Moscow, 2008, pp. 385–387.
2. Kablov E.N., Semenova L.V., Petrova G.N., Larionov S.A., Perfilova D.N. Polymer composite materials on a thermoplastic matrix. *Izvestiya vysshihkh uchebnykh zavedeniy. Ser.: Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya*, 2016, vol. 59, no. 10, pp. 61–71.
3. Barannikov A.A., Veshkin E.A., Postnov V.I., Strelnikov S.V. On the issue of production of floor panels from polymer composite materials for aircraft (review article). *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN*, 2017, no. 4-2, pp. 198–213.
4. Nacharkina A.V., Zelenina I.V., Valueva M.I., Barbotko S.L. Fire safety of high-temperature carbon fiber reinforced plastics for aviation purposes (review). *Trudy VIAM*, 2022, no. 7 (113), paper no. 12. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 29, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-7-134-150.
5. Kurnosov A.O., Sokolov I.I., Melnikov D.A., Topunova T.E. Fireproof fiberglass for interior of passenger aircraft (review). *Trudy VIAM*, 2015, no. 11, paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 29, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-11-7-7.
6. Serkova E.A., Zastrogina O.B., Barbotko S.L. Study of the possibility of use of new environmentally friendly organophosphorus flame retardants in the composition of binders for interior fire safety materials. *Trudy VIAM*, 2019, no. 2 (74), paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 29, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-2-24-34.
7. Veshkin E.A., Satdinov R.A., Barannikov A.A. Modern materials for the aircraft cabin. *Trudy VIAM*, 2021, no. 9 (103), paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 29, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-9-33-42.
8. Strelnikov S.V., Petukhov V.I., Postnov V.I., Shvets N.I. New solutions in the technology of manufacturing prepregs for interior panels. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN*, 2011, no. 4-2, pp. 498–507.
9. Satdinov R.A., Veshkin E.A., Postnov V.I. Assessment of the impact of climatic factors on the performance properties of fiberglass VPS-42P/T-64. *Trudy VIAM*, 2020, no. 10 (92), paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 29, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-10-21-29.

10. Barbotko S.L., Kirillov V.N., Shurkova E.N. Fire safety evolution for polymer composites of aeronautical application. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2012, no. 3, pp. 56–63.
11. Startsev V.O., Antipov V.V., Slavin A.V., Gorbovets M.A. Modern domestic polymer composite materials for aviation industry (review). *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 2 (71), paper no. 10. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: August 29, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
12. Sorokin A.E., Ivanov M.S., Sagomonova V.A. Thermoplastic polymer composite materials based on polyetheretherketones of various manufacturers. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 1 (66), paper no. 04. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: August 29, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-41-50.
13. Tkachuk A.I., Donetskyy K.I., Terekhov I.V., Karavaev R.Yu. The use of thermosetting matrices for the manufacture of polymer composite materials by the non-autoclave molding methods. *Aviation materials and technology*, 2021, no. 1 (62), paper no. 03. Available at: <https://www.journal.viam.ru> (accessed: August 29, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-22-33.
14. Imametdinov E.Sh., Valueva M.I. Promising materials: overview of works in the field of ultrahigh molecular weight polyethylene. Part 1. *Aviation materials and technologies*, 2024, no. 1 (74), paper no. 00. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: August 29, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-3-69-80.
15. Imametdinov E.S., Valueva M.I. Composites for piston engines (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 3 (60), pp. 19–28. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-3-19-28.

Информация об авторах

Колпачков Егор Дмитриевич, начальник сектора, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Вавилова Мария Ивановна, заместитель начальника лаборатории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Серкова Евгения Алексеевна, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Долгов Эдуард Юрьевич, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Антипов Владислав Валерьевич, заместитель генерального директора по науке, д.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Egor D. Kolpachkov, Head of Sector, Candidate of Sciences (Tech), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Maria I. Vavilova, Deputy Head of Laboratory, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Evgeniya A. Serkova, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Eduard Yu. Dolgov, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Vladislav V. Antipov, Deputy Director General for Science, Doctor of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 06.09.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 12.09.2024.
The article was submitted 06.09.2024; approved and accepted for publication after reviewing 12.09.2024.

Научная статья

УДК 669.81

DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-10-74-83

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ РАСШИРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ИНТЕРВАЛА ЭКСПЛУАТАЦИИ ОГНЕЗАЩИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

В.В. Антипов¹, М.А. Венедиктова¹, А.С. Пушница¹, Д.Д. Котельникова¹, А.В. Попов¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. Представлены результаты исследований физических, огневых и теплофизических свойств огнезащитного материала на основе фторсилоксанового каучука с различными системами функциональных добавок. Работа направлена на расширение температурного интервала (до 200 °С) эксплуатации огнезащитных материалов в условиях, допускающих контакт с топливом. Исследования подтверждают эффективность фосфатно-азотной интумесцентной системы благодаря образованию под действием высоких температур прочного защитного кокса, предотвращающего распространение огня.

Ключевые слова: антипирены, фторсилоксановые каучуки, теплопроводность, плотность, воспламеняемость

Для цитирования: Антипов В.В., Венедиктова М.А., Пушница А.С., Котельникова Д.Д., Попов А.В. Исследование возможности расширения температурного интервала эксплуатации огнезащитных материалов // Труды ВИАМ. 2024. № 10 (140). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-10-74-83.

Scientific article

INVESTIGATION OF THE POSSIBILITY OF INCREASING THE TEMPERATURE RANGE OF FIRE RETARDANT MATERIALS

V.V. Antipov¹, M.A. Venediktova¹, A.S. Pushnitsa¹, D.D. Kotelnikova¹, A.V. Popov¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. The article describes the results of research (physical, fire and thermophysical) properties of the flame retardant material based on fluorosiloxane rubber with different systems of functional additives. The work is aimed at extending the temperature range (up to 200 °C) of fire retardant materials operation, in environments that allow contact with fuel. Research confirms the efficiency of phosphate-nitrogen intumescent system, due to the formation of a durable protective carbon backbone under the influence of high temperatures, preventing the spread of fire.

Keywords: flame-retardants, fluorosiloxane rubbers, thermal conductivity, density, flammability

For citation: Antipov V.V., Venediktova M.A., Pushnitsa A.S., Kotelnikova D.D., Popov A.V. Investigation of the possibility of increasing the temperature range of fire retardant materials. Trudy VIAM, 2024, no. 10 (140), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-10-74-83.

Введение

Защита конструктивных элементов от перегрева (сохранение конструктивной устойчивости) в случае возникновения пожара, локализация возгорания на начальной стадии и его предотвращение являются основными задачами, решаемыми с применением вспенивающихся (интумесцентных) огнезащитных материалов [1–9].

В НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ разработаны материалы для защиты от перегрева конструкций авиационной техники при воздействии пламени с температурой 1100 ± 50 °С в течение ≥ 15 мин. Огнезащитный материал марки ВЗО-9х используется для защиты конструкций из металла и полимерных композиционных материалов, работающих в контакте с горюче-смазочными материалами при температуре от -60 до $+120$ °С. Данный материал имеет высокую адгезию к различным подложкам, в том числе после вспенивания, что позволяет выдерживать вибрационное воздействие. Огнезащитные материалы марок ВОЗП-4 и ВЗО-9 предназначены для работы в воздушной среде при температурах от -60 до $+150$ °С, характеризуются стойкостью к климатическому старению и высокой коксуемостью. Высокая эластичность позволяет применять данные материалы для защиты конструкций, работающих при повышенных деформациях [10–12].

Развитие авиационной техники неразрывно связано с увеличением температур эксплуатации узлов изделий, что, в свою очередь, приводит к неизбежному повышению требований к условиям эксплуатации материалов. В настоящее время в узлах новой и перспективной авиационной техники, которые нуждаются в дополнительной огневой защите, температура в процессе эксплуатации может достигать 200 °С, что ограничивает применение ранее разработанных огнезащитных материалов.

Разработка огнезащитных материалов, работоспособных при таких высоких температурах, является сложной комплексной задачей, поскольку устойчивое образование коксового слоя предполагает выделение газов после расплавления пленки до начала ее затвердевания, т. е. до образования карбонизированного слоя. В связи с этим компоненты вспенивающей системы должны подбираться таким образом, чтобы они могли реагировать в определенной последовательности в узком температурном интервале [13].

В данной статье представлены результаты исследований комплекса физических, огневых и теплофизических характеристик огнезащитного материала с различными системами вспенивающих/карбонизирующих добавок и антипиренов (функциональных добавок).

Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 17.5. «Теплозащитные материалы и покрытия» [14–16].

Материалы и методы

В качестве объектов исследований выбраны огнезащитные составы на основе низкомолекулярного фторсилоксанового каучука. Указанный полимер отвечает необходимым требованиям к температуре эксплуатации, а также обладает стойкостью к воздействию горюче-смазочных материалов [17–21]. Вулканизирующую систему вводили в пасту перед формированием огнезащитного слоя, так как процесс структурирования данной системы осуществляется при температуре 23 ± 2 °С по технологии RTV (room temperature vulcanizing), продолжительность полного отверждения составляет 72 ч.

Выбор функциональных добавок основан на анализе научно-технической литературы [22–29] и учитывает их физические свойства. Поскольку основной задачей является расширение температурного интервала эксплуатации огнезащитных материалов, то температура разложения функциональных добавок не должна быть < 200 °С. Кроме того, при воздействии теплового потока на огнезащитный материал во вспененном состоянии коксовый слой с низкой теплопроводностью должен сохранять каркасность и прочность, чтобы не допустить перегрева элементов защищаемой конструкции. Физические свойства основных компонентов, выбранных для исследований, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Физические свойства компонентов

Компонент	Плотность, г/см ³	Температура разложения, °С
Низкомолекулярный фторсилоксановый каучук	1,05	≥250
2,2-бис(гидроксиметил)пропан-1,3-диол	1,40	>200
Аммонийная соль полифосфорной кислоты	1,90	320
2,4,6-триамино-1,3,5-триазин	1,60	370
Бис(пентабромфениловый) эфир	3,00	305
Триоксид сурьмы	5,20	930
Полифосфат меламина	1,85	350
Цианурат меламина	1,50	320
Смесь антипиренов на основе азота и фосфора	1,46	250

С целью изучения влияния функциональных добавок на теплофизические и эксплуатационные свойства материалов в лабораторных условиях изготовлены экспериментальные огнезащитные составы (табл. 2). Во всех составах в качестве полимерной матрицы использован низкомолекулярный фторсилоксановый каучук, а в качестве вулканизирующей системы – катализатор холодного отверждения и структурирующий агент.

Таблица 2

Экспериментальные огнезащитные составы

Условный номер состава	Функциональные добавки
1	2,2-бис(гидроксиметил)пропан-1,3-диол, аммонийная соль полифосфорной кислоты, 2,4,6-триамино-1,3,5-триазин
2	Бис(пентабромфениловый) эфир, триоксид сурьмы
3	Полифосфат меламина, цианурат меламина, смесь антипиренов на основе азота и фосфора

Для исследования эффективности выбранных систем функциональных добавок определяли плотность в соответствии с ГОСТ 267–73; твердость по Шору А – ГОСТ 263–75; кратность вспенивания и горючесть – АП-25 (п. 853 (а), Приложение F, Часть I), ОСТ 1 90094–79; огнестойкость – СТО 1-595-20-532–2017. Определены потеря массы в динамическом режиме по ГОСТ 56721–2015 в диапазоне температур от 25 до 250 °С со скоростью нагрева 10 °С/мин в среде воздуха (скорость потока 70 мл/мин) и коэффициент теплопроводности в соответствии с ГОСТ 57943–2017. Измерения проводили в среде аргона (скорость потока 70 мл/мин).

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Результаты и обсуждение

При исследовании огнезащитных материалов в первую очередь определены физические характеристики. Значительное внимание в авиационной технике уделяется плотности материалов, применяемых в конструкции. От значений твердости по Шору А зависит способность материала сохранять эффективность на протяжении всего периода эксплуатации (стойкость к механическому воздействию).

Результаты физических испытаний экспериментальных составов приведены в табл. 3. При равном содержании функциональных добавок состав 1 характеризуется меньшей плотностью в сравнении с составами 2 и 3.

Таблица 3

Физические свойства огнезащитных составов

Условный номер состава	Плотность, г/см ³	Твердость по Шору А, усл. ед.
1	1,17	52
2	1,31	38
3	1,26	68

Более низкую плотность состава 1 можно объяснить химической природой, внутренней структурой и взаимодействием компонентов на молекулярном уровне. Так, 2,2-бис(гидроксиметил)пропан-1,3-диол, являясь полиолом, способствует образованию легкой полиэфирной сетки. Аммонийная соль полифосфорной кислоты и 2,4,6-триамино-1,3,5-триазин могут образовать компактные структуры, содержащие значительное количество воздушных включений. Эти включения, в свою очередь, уменьшают общую плотность состава 1.

Высокая твердость составов 1 и 3, по-видимому, обусловлена высокой удельной поверхностью функциональных добавок. Возможно, компоненты, содержащие гидроксильные группы (2,2-бис(гидроксиметил)пропан-1,3-диол, цианурат меламина), участвуют в процессе отверждения, что приводит к увеличению твердости за счет образования большего количества пространственных сшивок. Очевидно, что на показатель плотности состава 3 также повлияло содержание антипиренов с высокой плотностью.

Согласно многочисленным теоретическим и экспериментальным исследованиям, при высокотемпературном воздействии в верхних слоях огнезащитного материала происходят увеличение толщины коксового слоя и его внутренний унос. Однако при продолжительном воздействии нижние невспененные слои материала, находящиеся в предпиролизной зоне, выполняют теплоизоляционную функцию. В связи с этим определение теплофизических характеристик огнезащитных материалов в исходном состоянии также представляет практический интерес.

Результаты теплофизических исследований представлены в табл. 4. В интервале температур до 200 °С наблюдается незначительное изменение тепловых эффектов, что указывает на высокую термостойкость данных составов. Потеря массы составила от 0,07 до 0,72 %. Можно сделать вывод, что огнезащитные составы сохраняют эксплуатационные характеристики в необходимом температурном интервале. Показатели теплопроводности обратно пропорциональны значениям плотности и подтверждают ранее сделанные предположения.

Таблица 4

Теплофизические свойства огнезащитных составов

Условный номер состава	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	Потеря массы в изотермическом режиме при температуре 200 °С, %
1	0,30	0,67
2	0,14	0,72
3	0,21	0,07

С целью комплексной оценки влияния антипиренов на эффективность огнезащитного материала на основе фторсилоксанового каучука проведена оценка огневых характеристик. Горючесть огнезащитного материала оценивали в вертикальном положении, такие условия считаются наиболее сложными. Продолжительность выдержки составила 60 с, максимальная температура пламени горелки: 840 °С.

Исследования огнестойкости проводили на образцах, состоящих из металлической подложки из сплава Д16-АТ толщиной 2,0 мм с нанесенным на нее огнезащитным материалом толщиной 2,0±0,1 мм, с использованием средств контроля температуры на внешней стороне защищаемой поверхности при воздействии пламени

с температурой 1100 ± 50 °С. Результаты испытаний на горючесть и огнестойкость представлены в табл. 5.

Таблица 5

Показатели горючести огнезащитных составов			
Условный номер состава	Горючесть	Продолжительность остаточного горения, с	Температура на тыльной поверхности образца, °С
1	Трудногорящий	0	208
2			255
3	Сгорающий	35	308

Все составы являются огнестойкими. Наименьшая температура на подложке зафиксирована для состава 1, что указывает на высокую эффективность функциональных добавок. По показателю горючести составы 1 и 2 не поддерживают остаточного горения и являются трудногорящими. Состав 3 по показателю горючести не удовлетворяет требованиям АП-25, следовательно, не может рассматриваться в качестве эффективного огнезащитного материала для авиационной техники. Продолжительность остаточного горения состава 3, наполненного производными меламина, обусловлена критической толщиной образцов [30].

На рис. 1 показано изменение температуры на защищаемой поверхности образцов подложки из сплава Д16-АТ с нанесенным огнезащитным материалом.

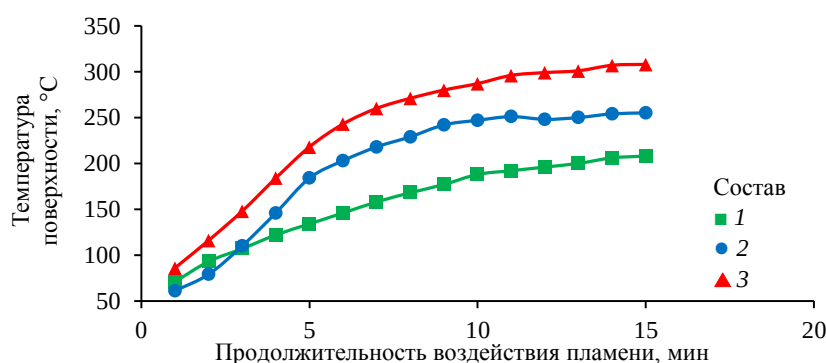


Рис. 1. Зависимость температуры на защищаемой поверхности образцов от продолжительности воздействия пламени с температурой 1100 ± 50 °С

Составы 1 и 3 имеют схожий механизм вспенивания. Однако состав 3 демонстрирует недостаточную стойкость к воздействию огня, так как его температура на тыльной стороне превышает значения, полученные для состава 1, на 48 % и достигает 308 °С. Можно предположить, что это связано с соотношением функциональных добавок. Так, в составе 1 подобрано оптимальное содержание полигидратных компонентов, образующих при взаимодействии с кислотными, прочный кокс. Он состоит из жесткой оболочки без трещин и мягкой пористой структуры внутри, препятствующей движению тепловых потоков.

В составе 3 преобладает цианурат меламина. При поглощении тепла данное соединение сублимируется и разлагается в процессе сгорания, отводя тепло. В то же время при разложении выделяются инертные газы, такие как аммиак, которые разбавляют кислород и горючие газы. При этом оболочка кокса недостаточно прочная, имеет трещины у основания. По этой причине усиливается теплопередача, и металлическая подложка сильнее нагревается.

Галогенсодержащий антипирен, входящий в состав 2, применяется в сочетании с оксидом сурьмы и работает по принципу снижения температуры пламени в газовом слое

у поверхности полимерной матрицы, что способствует ингибированию процесса горения. В связи с этим данная система эффективно работает на первой стадии разложения, где все процессы происходят во фронте деструкции на поверхности материала (рис. 2). При продолжительном высокотемпературном воздействии по причине недостаточной толщины коксового слоя материал быстро переходит от стадии нестационарного разложения (внутреннего уноса) к стадии механического разрушения и уноса коксового слоя.

На рис. 2 изображены экспериментальные образцы с исследуемыми огнезащитными материалами после испытаний на определение огнестойкости. Анализ внешнего вида вспененного слоя показывает, что его плотность и пористость могут варьироваться в зависимости от соотношения азота и фосфора в антипиренах для составов 1 и 3. В составе 1, содержащем большее количество фосфора, наблюдается более плотная структура коксового слоя. Это свидетельствует о более высокой термостойкости и меньшей прогораемости данного материала. Состав 2 имеет небольшой прочный коксовый слой. Внешний вид образцов подтверждает результаты испытаний, полученные при оценке огнестойкости.

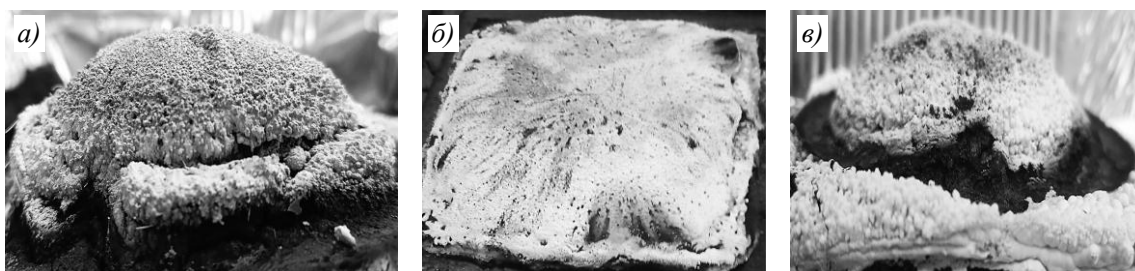


Рис. 2. Внешний вид вспененных под влиянием огня образцов с огнезащитными материалами, изготовленными с применением составов 1 (а), 2 (б) и 3 (в)

На рис. 3 приведены результаты определения кратности вспенивания до и после экспозиции в топливе ТС-1 при температуре $23 \pm 2^\circ\text{C}$ в течение 30 сут. Кратковременный контакт поверхности огнезащитного материала с топливом ТС-1 незначительно влияет на формирование коксового слоя. Так, для состава 3 кратность вспенивания уменьшилась на 13 %, для состава 2 – на 6 %. При этом наибольшее значение коэффициента вспенивания огнезащитного материала до и после экспозиции соответствует составу 1. Несмотря на незначительное снижение коэффициента вспенивания, необходимо обратить внимание на потенциальные долгосрочные последствия воздействия топлива на огнезащитные материалы и предусмотреть применение дополнительного слоя специализированного лакокрасочного материала с целью минимизации негативных последствий в процессе эксплуатации.

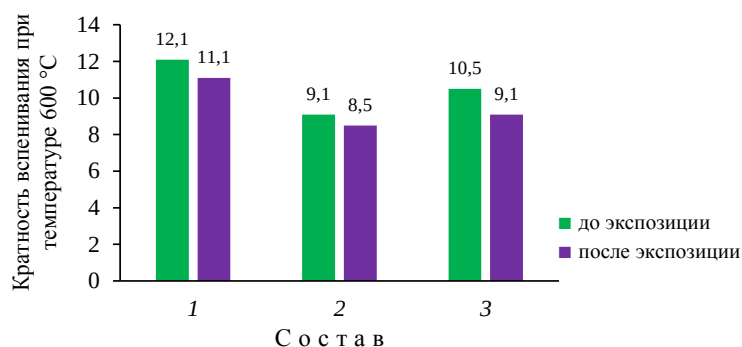


Рис. 3. Кратность вспенивания огнезащитного материала до и после экспозиции в топливе ТС-1 в течение 30 сут

Следует отметить, что исследованные составы огнезащитных материалов вносят значительный вклад в понимание механизма вспенивания и его зависимости от химической природы антипиренов. В частности, структурные различия фторсилоксановых и других полимерных матриц могут существенно влиять на эффективность огнезащитного состава. Полимерная матрица служит основой для формирования вспененной структуры, ее взаимосвязь с антипиренами определяет конечный результат термической защиты поверхности материала.

Заключения

Анализируя результаты проведенных испытаний огнезащитных материалов, следует выделить следующие преимущества разработанных составов на основе низкомолекулярных фторсилоксановых каучуков:

- вулканизация проходит при температуре окружающей среды 23 °С;
- низкая плотность;
- работоспособность в условиях кратковременного контакта с топливом.

Огнезащитный материал, изготовленный с применением состава 1, эффективно защищает элементы конструкций авиационной техники при температуре до 200 °С без потери функциональных свойств.

Важно отметить, что эффективность фосфатно-азотной интумесцентной системы в составе на основе фторсилоксановых каучуков обусловлена не только химической стойкостью, но и высокой термостойкостью. Исследования показывают, что такие материалы под действием высоких температур образуют плотный защитный слой, предотвращая распространение огня и дальнейшее разрушение структуры.

Не менее важным аспектом является проведение дополнительных исследований по выявлению механизмов синергетического действия антипиренов и оксида сурьмы, что может открыть новые перспективы для разработки высокоэффективных огнезащитных систем. Более глубокое понимание данных процессов позволит не только улучшить существующие составы, но и разработать инновационные решения, обеспечивающие максимальную защиту различных конструкций и материалов от воздействия высоких температур.

Благодарности

Авторы выражают благодарность С.Л. Барботько и В.А. Большакову за помощь в проведении высокотемпературных исследований.

Список источников

1. Гончарова П.Ю., Бабкин О.Э., Сиротина М.В. Рецептные принципы создания эффективных огнезащитных УФ-отверждаемых композиций вспучивающегося типа // Инновационные материалы и технологии в дизайне. СПб., 2016. С. 42–48.
2. Габдулин Р.Ш. Эффективные способы огнезащиты строительных конструкций // Безопасность. 2011. № 1. С. 48–49.
3. Яковлев А.Д., Яковлев С.А. Лакокрасочные покрытия функционального назначения. СПб.: ХИМИЗДАТ, 2016. 272 с.
4. Барботько С.Л., Вольный О.С., Кириенко О.А., Шуркова Е.Н. Оценка пожаробезопасности полимерных материалов авиационного назначения: анализ состояния, методы испытаний, перспективы развития, методические особенности / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ, 2018. 424 с.
5. Mouritz A.P., Gibson A.G. Fire properties of polymer composite materials. Dordrecht: Springer Science & Business Media, 2007. P. 59–63.
6. Lyon R.E. Fire-safe aircraft cabin materials // Fire & Polymers, ACS Symposium Series. 1995. No. 559. P. 618–638.
7. Авдудевский В.С., Галицейский Б.М., Глебов Г.А. Основы теплопередачи в авиационной и ракетно-космической технике / под ред. В.К. Кошкина. М.: Машиностроение, 1975. 623 с.

8. Халтуринский Н.А., Попова Т.В., Берлин А.А. Горение полимеров и механизм действия антипиренов // Успехи химии. 1984. Т. 53. № 2. С. 326–346.
9. Асеева Р.М., Заиков Г.Е. Горение полимерных материалов. М.: Наука, 1981. 280 с.
10. Краснов Л.Л., Кирина З.В. Материалы, обеспечивающие надежность работы конструктивных элементов в условиях пожара // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2012. № 10. С. 48–52.
11. Венедиктова М.А., Краснов Л.Л., Кирина З.В. Некоторые аспекты применения огнезащитных покрытий (обзор) // Новости материаловедения. Наука и техника. 2018. № 1–2. Ст. 06. URL: <http://www.materialsnews.ru> (дата обращения: 07.09.2024).
12. Венедиктова М.А., Евдокимов А.А., Краснов Л.Л., Петрова А.П. Исследование возможности применения огнезащитной пасты для повышения пожаробезопасности конструкций из ПКМ // Труды ВИАМ. 2021. № 9 (103). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 07.09.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-9-67-75.
13. Зыбина О.А., Варламов А.В., Чернова Н.С., Мнацаканов С.С. О роли и превращениях компонентов огнезащитных вспучивающихся лакокрасочных композиций в процессе термолиза // Журнал прикладной химии. 2009. Т. 82. № 4. С. 1445–1449.
14. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. № 1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
15. Каблов Е.Н. Роль химии в создании материалов нового поколения для сложных технических систем // XX Менделеевский съезд по общей и прикладной химии. Екатеринбург, 2016. С. 25–26.
16. Каблов Е.Н., Антипов В.В. Роль материалов нового поколения в обеспечении технологического суверенитета Российской Федерации // Вестник Российской академии наук. 2023. Т. 93. № 10. С. 907–916.
17. Шетц М. Силиконовый каучук. М.: Химия, 1975. 400 с.
18. Долгов О.Н., Воронков М.Г., Гринблат М.П. Кремнийорганические жидкие каучуки и материалы на их основе. Л.: Химия, 1975. 112 с.
19. Большой справочник резинщика: в 2 ч. / под ред. С.В. Резниченко, Ю.Л. Морозова. М.: Техинформ, 2012. Ч. 1, 2. 1385 с.
20. Каучук и резина. Наука и технология / под ред. Дж. Марка, Б. Эрмана, Ф. Эйрича; пер. с англ. / под ред. А.А. Берлина, Ю.Л. Морозова. Долгопрудный: Интеллект, 2011. 768 с.
21. Корнев А.Е., Буканов А.М., Шевердяев О.Н. Технология эластомерных материалов. М.: Исток, 2009. 502 с.
22. Крашенинникова М.В. Огнезащитные вспучивающиеся материалы на основе органорастворимых пленкообразователей // Лакокрасочные материалы и их применение. 2006. № 12. С. 14–16.
23. Павлович А.В., Владенков В.В., Изюмский В.Н., Кильчицкая С.Л. Огнезащитные вспучивающиеся покрытия // Лакокрасочная промышленность. 2012. № 5. С. 22–27.
24. Заиков Г.Е. Горение, деструкция и стабилизация полимеров. СПб.: Научные основы и технологии, 2008. 421 с.
25. Кодолов В.И. Горючесть и огнестойкость полимерных материалов. М.: Химия, 1976. 98 с.
26. Кодолов В.И. Замедлители горения полимерных материалов. М.: Химия, 1980. 156 с.
27. Потапова А.И., Боброва И.И., Евдокимов А.А., Венедиктова М.А. Рецепттурные приемы создания эластомерных композиций с пониженной горючестью // Труды ВИАМ. 2024. № 1 (131). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 07.09.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-1-60-77.
28. Кондрашов С.В., Соловьянчик Л.В., Ларионов С.А., Вольный О.С. Исследование влияния антипиренов на горючесть и показатель текучести расплава алифатических полиамидов // Труды ВИАМ. 2022. № 2 (108). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 07.09.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-2-52-63.
29. Гаращенко А.Н., Кульков А.А., Страхов В.Л. Влияние срока эксплуатации на огнезащитную эффективность вспучивающихся покрытий и огнестойкость конструкций // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 2 (67). Ст. 09. URL: <https://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 07.09.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-2-97-110.

30. Барботько С.Л., Вольный О.С., Шуркова Е.Н. Построение феноменологической модели, описывающей изменение характеристики горючести (продолжительности остаточного горения) в зависимости от толщины полимерного материала // Труды ВИАМ. 2018. № 10 (70). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 07.09.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-10-107-116.

References

1. Goncharova P.Yu., Babkin O.E., Sirotinina M.V. Formulation principles for creating effective fire-retardant UV-curable intumescent compositions. *Innovative materials and technologies in design*. St. Petersburg, 2016, pp. 42–48.
2. Gabdulin R.Sh. Effective methods of fire protection of building structures. *Bezopasnost*, 2011, no. 1, pp. 48–49.
3. Yakovlev A.D., Yakovlev S.A. *Functional-purpose paint and varnish coatings*. St. Petersburg: Khimizdat, 2016, 272 p.
4. Barbotko S.L., Volny O.S., Kiriyaenko O.A., Shurkova E.N. *Fire safety assessment of polymeric materials for aviation purposes: analysis of the state, test methods, development prospects, methodological features*. Ed. E.N. Kablov. Moscow: VIAM, 2018, 424 p.
5. Mouritz A.P., Gibson A.G. *Fire properties of polymer composite materials*. Dordrecht: Springer Science & Business Media, 2007, pp. 59–63.
6. Lyon R.E. Fire-safe aircraft cabin materials. *Fire & Polymers, ACS Symposium Series*, 1995, no. 559, pp. 618–638.
7. Avduevsky V.S., Galitseysky B.M., Glebov G.A. *Fundamentals of Heat Transfer in Aviation and Rocket-Space Engineering*. Ed. V.K. Koshkin. Moscow: Mashinostroyeniye, 1975, 623 p.
8. Khalturinsky N.A., Popova T.V., Berlin A.A. Combustion of Polymers and the Mechanism of Action of Flame Retardants. *Uspekhi Khimii*, 1984, vol. 53, no. 2, pp. 326–346.
9. Aseeva R.M., Zaikov G.E. *Combustion of Polymer Materials*. Moscow: Nauka, 1981, 280 p.
10. Krasnov L.L., Kirina Z.V. Materials Ensuring the Reliability of Structural Elements in Fire Conditions. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2012, no. 10, pp. 48–52.
11. Venediktova M.A., Krasnov L.L., Kirina Z.V. Some aspects of the application of fire-protective coatings (review). *Novosti materialovedeniya. Nauka i tekhnika*, 2018, no. 1–2, paper no. 06. Available at: <http://www.materialsnews.ru> (accessed: September 07, 2024).
12. Venediktova M.A., Evdokimov A.A., Krasnov L.L., Petrova A.P. Research of possibility of application of fireproof paste for increase of fire safety of designs from polymeric composite materials. *Trudy VIAM*, 2021, no. 9 (103), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: September 07, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-9-67-75.
13. Zybina O.A., Varlamov A.V., Chernova N.S., Mnatsakanov S.S. On the role and transformations of components of fire-retardant intumescent paint and varnish compositions in the process of thermolysis. *Zhurnal prikladnoy khimii*, 2009, vol. 82, no. 4, pp. 1445–1449.
14. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
15. Kablov E.N. The role of chemistry in the creation of new generation materials for complex technical systems. *XX Mendeleev Congress on General and Applied Chemistry*. Ekaterinburg, 2016, pp. 25–26.
16. Kablov E.N., Antipov V.V. The role of new generation materials in ensuring the technological sovereignty of the Russian Federation. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*, 2023, vol. 93, no. 10, pp. 907–916.
17. Shetz M. *Silicone rubber*. Moscow: Khimiya, 1975, 400 p.
18. Dolgov O.N., Voronkov M.G., Grinblat M.P. *Organosilicon liquid rubbers and materials based on them*. Leningrad: Khimiya, 1975, 112 p.
19. *The Big Handbook of the Rubber Manufacturer*: in 2 parts. Eds. S.V. Reznichenko, Yu.L. Morozov. Moscow: Tekhninform, 2012, part 1, 2, 1385 p.
20. *Rubber and Rubber. Science and Technology*; trans. from Engl. Eds. A.A. Berlin, Yu.L. Morozov. Dolgoprudny: Intellect, 2011, 768 p.

21. Kornev A.E., Bukanov A.M., Sheverdyayev O.N. *Technology of Elastomeric Materials*. Moscow: Istok, 2009, 502 p.
22. Krashenninnikova M.V. Fire-retardant intumescent materials based on organosoluble film formers. *Lakokrasochnye materialy i ikh primeneniye*, 2006, no. 12, pp. 14–16.
23. Pavlovich A.V., Vladenkov V.V., Izyumsky V.N., Kilchitskaya S.L. Fire-retardant intumescent coatings. *Lakokrasochnaya promyshlennost*, 2012, no. 5, pp. 22–27.
24. Zaikov G.E. *Combustion, destruction and stabilization of polymers*. St. Petersburg: Scientific foundations and technologies, 2008, 421 p.
25. Kodolov V.I. *Flammability and fire resistance of polymeric materials*. Moscow: Khimiya, 1976, 98 p.
26. Kodolov V.I. *Flame retardants for polymeric materials*. Moscow: Khimiya, 1980, 156 p.
27. Potapova A.I., Bobrova I.I., Evdokimov A.A., Venediktova M.A. Prescription techniques for creating elastomeric compositions with reduced flammability. *Trudy VIAM*, 2024, no. 1 (131), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: September 07, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-1-60-77.
28. Kondrashov S.V., Solovyanchik L.V., Larionov S.A., Volny O.S. Investigation of the effect of flame retardants on the flammability and fluidity of the melt of aliphatic polyamides. *Trudy VIAM*, 2022, no. 2 (108), paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: September 07, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-2-52-63.
29. Garashchenko A.N., Kulkov A.A., Strakhov V.L. The effect of the service life on the flame-retardant efficiency of the bulging coatings and the fire resistance of structures. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 2 (67), paper no. 09. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: September 07, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-2-97-110.
30. Barbotko S.L., Volnyy O.S., Shurkova E.N. Creation of the phenomenological model describing change of the characteristic of combustibility (duration of residual burning) depending on thickness of polymeric material. *Trudy VIAM*, 2018, no. 10 (70), paper no. 12. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: September 07, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-10-107-116.

Информация об авторах

Антипов Владислав Валерьевич, заместитель генерального директора по науке, д.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Венедиктова Мария Анатольевна, начальник лаборатории, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Пушница Анна Сергеевна, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Котельникова Дарья Дмитриевна, инженер 2 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Попов Алексей Валерьевич, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Vladislav V. Antipov, Deputy General Director for the Science, Doctor of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Mariy A. Venediktova, Head of Laboratory, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Anna S. Pushnitsa, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Darya D. Kotelnikova, Second Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Alexey V. Popov, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 13.09.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 17.09.2024.
The article was submitted 13.09.2024; approved and accepted for publication after reviewing 17.09.2024.

Научная статья

УДК 539.612

DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-10-84-93

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ВРЕМЯ ВЫСЫХАНИЯ И ЖИЗНЕСПОСОБНОСТЬ ШПАТЛЕВКИ НА ОСНОВЕ ЭПОКСИВИНИЛЭФИРНОЙ СМОЛЫ

С.А. Марченко¹, П.В. Скирко¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. Изучено влияние температуры и влажности среды на скорость отверждения шпатлевки на основе ненасыщенной полиэфирной смолы (эпоксивинилэфирной): исследована жизнеспособность шпатлевки после смешения с отвердителем и ускорителем, время высыхания до степени 3 покрытия шпатлевки. Определены физико-механические свойства покрытия шпатлевки при отверждении в различных условиях температуры и влажности. Определены оптимальные температура и влажность (при выполнении работ на открытых площадках) при отверждении покрытий на основе эпоксивинилэфирной шпатлевки.

Ключевые слова: ненасыщенные полиэфирные смолы, эпоксивинилэфирная смола, шпатлевка, время высыхания до степени 3, жизнеспособность

Для цитирования: Марченко С.А., Скирко П.В. Влияние температуры на время высыхания и жизнеспособность шпатлевки на основе эпоксивинилэфирной смолы // Труды ВИАМ. 2024. № 10 (140). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-10-84-93.

Scientific article

EFFECT OF TEMPERATURE ON DRYING TIME AND VIABILITY OF EPOXYVINYL ETHER RESIN PUTTY

S.A. Marchenko¹, P.V. Skivko¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. The influence of ambient temperature and humidity on the curing rate of putty based on unsaturated polyester resin (epoxy vinyl ether) was studied: the viability of the putty after mixing with a hardener and accelerator, the drying time to degree 3 of the putty coating was investigated. The physical and mechanical properties of the putty coating during curing under various temperature and humidity conditions have been determined. The optimal temperature and humidity (when working in open areas) were determined during the curing of coatings based on epoxy vinyl ether putty.

Keywords: unsaturated polyester resins, epoxy vinyl ether resin, putty, drying time to degree 3, viability.

For citation: Marchenko S.A., Skivko P.V. Effect of temperature on drying time and viability of epoxyvinyl ether resin putty. *Trudy VIAM*, 2024, no. 10 (140), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-10-84-93.

Введение

Одно из основных направлений в разработке лакокрасочных покрытий – это создание материалов с наибольшим временем жизнеспособности и наименьшей продолжительностью отверждения. Кроме этого, при быстром отверждении не должны ухудшаться защитные и декоративные свойства покрытий. Одним из способов быстрого отверждения покрытий является создание лакокрасочных материалов (в данном случае шпатлевки) на основе ненасыщенных полиэфирных смол.

Ненасыщенные полиэфирные смолы широко применяются в технике и народном хозяйстве как в качестве матричного полимера в армированных волокном композитах, так и для изготовления различных клеев, полимербетона, искусственного камня, эмалей, грунтовок и шпатлевок [1–8]. На основе ненасыщенных полиэфиров со стекловолокнистыми наполнителями получают стеклопластики, характеризующиеся высокой удельной прочностью, хорошими диэлектрическими свойствами и повышенной коррозионной устойчивостью.

В настоящее время основной объем применяемых шпатлевок (исходя из химической основы связующего вещества) составляют полиэфирные шпатлевки различного назначения. Эти материалы обладают наименьшей усадкой (при относительно большой толщине наносимого слоя) и наибольшей скоростью полимеризации, по сравнению со шпатлевками на акриловой или нитроакриловой основах [9].

Ненасыщенные полиэфирные смолы – это продукты поликонденсации ненасыщенных дикарбоновых кислот и многоосновных спиртов. Двойные связи, находящиеся в цепях молекул полиэфиров, способны к радикальной сополимеризации с мономерными (мет)акрилатами, аллильными соединениями и другими ненасыщенными мономерами, в особенности со стиролом. Реакция отверждения составов на основе ненасыщенных полиэфиров протекает либо при инициировании органическими пероксидами или гидропероксидами, либо при фотохимическом инициировании ультрафиолетовым светом в присутствии фотоинициаторов [10].

Кислород воздуха снижает скорость радикальной полимеризации, что обусловлено преждевременным обрывом цепи из-за образования пероксидных радикалов. Для предотвращения этого явления в состав шпатлевки вводят экранирующие добавки (например, парафин) или добавляют в рецептуру смолу, которая содержит аллильные эфирные группы, обеспечивающие устранение ее липкости [11].

Обычное отверждение ненасыщенных полиэфирных смол может протекать при повышенных температурах или холодном отверждении (при добавлении ускорителей). Покрытия обычно получают при холодном отверждении. Распространенными комбинациями инициатора и ускорителя являются следующие системы: (гидро)пероксид кетона и октоат кобальта или пероксид бензоила и третичный ароматический амин в случае высоконаполненных систем (шпатлевок). Химическое сшивание начинается сразу после смешения компонентов. Жизнеспособность и время высыхания зависят от соотношения полуфабриката шпатлевки к отвердителю и ускорителю и температуры. Поскольку при отверждении отсутствует необходимость в улетучивании растворителей, ненасыщенные полиэфирные рассматриваются как продукты, не опасные для окружающей среды, поэтому за одну операцию нанесения можно достичь достаточно большой толщины покрытия [12].

Улучшение эксплуатационных свойств в полиэфирных шпатлевках обеспечиваются наполнители и добавки. Введение наполнителей снижает уровень остаточных напряжений в матрице композитов с сетчатой структурой полимера. Основной проблемой таких композитов является горение с образованием токсичных газообразных углеводородных соединений, поэтому в их состав добавляют антипирены. Для повышения огнестойкости материала необходимо большое количество наполнителей в составе, что

ухудшает физические свойства материала, поэтому обычные наполнители макро- и микрометрового размера заменяют на наноразмерные частицы [13–15].

В данной работе определены оптимальные температура и влажность (при выполнении работ на открытых площадках) при отверждении покрытий на основе эпоксивинилэфирной шпатлевки.

Работа выполнена в рамках реализации стратегического направления 17. «Комплексная антикоррозионная защита, упрочняющие, износостойкие защитные и теплозащитные покрытия» комплексной научной проблемы 17.7. «Лакокрасочные материалы и покрытия на полимерной основе» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года»).

Материалы и методы

Для определения влияния температуры на жизнеспособность и времени высыхания до степени 3 исследовано покрытие шпатлевки на основе эпоксивинилэфирной смолы, наполненной различными добавками и наполнителями, улучшающими свойства.

В качестве ускорителя использовался раствор кобальтовой соли одноосновных органических кислот в стироле, а отвердителя – гидроперекись кумола.

Для подложки использовали образцы из алюминиевого сплава Д16 с нанесенным покрытием Ан.Окс.нхр размером 150×70 мм и стеклянные пластины размером 90×120 мм. На подложку пластиковым шпателем наносили шпатлевку. Образцы с нанесенными покрытиями выдерживали в камере с постоянными условиями – при заданной температуре и влажности. Для определения физико-механических свойств и адгезии покрытия выдерживали в течение 5 сут при температуре 20±2 °С.

Значения времени высыхания покрытий до степени 3 определяли по ГОСТ 19007–73. Поверх окрашенной пластины помещали лист бумаги, на него накладывали резиновую пластину, на середину которой устанавливали гирю массой 200 г. Через 60 с груз и резиновую пластину убирали, а окрашенную пластину с листом бумаги свободно бросали на деревянную поверхность. Степень высыхания оценивали через 30 с после снятия груза. Если бумага не прилипла к пленке, фиксировали время достижения степени высыхания 3.

Жизнеспособность шпатлевки определяли по ГОСТ 27271–2014. Сущность метода заключается в определении жизнеспособности путем повторного определения конкретного показателя (способность к нанесению) через установленный промежуток времени. По прошествии 1 ч после смешения компонентов на образец шпателем наносят шпатлевку. Если по истечении указанного времени она легко наносится шпателем, не сворачиваясь под ним, испытание повторяют через каждые 15 мин, до получения отрицательного результата. За результат принимают последнее время проведения испытания, когда шпатлевка сохраняет способность к равномерному нанесению.

Толщину покрытий измеряли с помощью прибора «Константа К6Ц» в соответствии с ГОСТ 31993–2013.

Прочность покрытий при ударе определяли по ГОСТ 4765–73. За результат принимали числовое значение максимальной высоты в сантиметрах, при падении с которой груз массой 1 кг не наносит механических повреждений покрытию испытываемого образца.

Твердость покрытия замеряли с помощью маятникового прибора ТМЛ (маятник Б) по ГОСТ 5233–2021.

Адгезию покрытий определяли с помощью метода решетчатого надреза по ГОСТ 31149–2014 при расстоянии между надрезами 3 мм.

Работа выполнена при поддержке ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ».

Результаты и обсуждение

На результаты испытаний существенно влияет состав шпатлевки. В винилэфирной смоле только две сложноэфирные группы в молекуле, что обеспечивает отличную химическую стойкость и устойчивость к гидролизу по сравнению с обычными полиэфирными смолами [16]. Отвержденная винилэфирная смола может иметь двухфазную микроструктуру, состоящую из фазы стирола с более низкой температурой стеклования и фазы винилэфирного эфира с более высокой температурой стеклования [17, 18]. Кинетика отверждения каждой фазы оказывает значительное влияние на термические свойства системы, такие как степень сшивки, температура стеклования и окончательная конверсия [19]. Высокое содержание стирола может привести к уменьшению плотности поперечных связей, что приводит к снижению температуры стеклования [20].

Непосредственное влияние на жизнеспособность и время высыхания шпатлевки оказывают наполнители в ее составе. Природные силикаты, такие как диопсид и волластонит, играют роль ускорителей отверждения полиэфирной смолы, а цеолит тормозит этот процесс. Степень дисперсности наполнителя оказывает влияние на скорость отверждения за счет адсорбции на поверхности наполнителя кислорода воздуха, ингибирующего отверждение. С повышением дисперсности, т. е. с увеличением площади удельной поверхности наполнителя, ингибирование возрастает [21, 22].

В данной работе рассмотрено влияние внешней среды – температуры и влажности – при отверждении покрытия. Состав шпатлевки, количество ускорителя и отвердителя при отверждении проб были идентичны.

Средняя толщина полимерных покрытий, которые использовались для определения времени высыхания, физико-механических свойств и адгезии, находилась в интервале 190–230 мкм.

Результаты исследования зависимости жизнеспособности и времени высыхания до степени 3 шпатлевки от температуры представлены в табл. 1. Для исключения параметра влажности, испытания проводили при ее различных значениях.

Таблица 1

Зависимость жизнеспособности и времени высыхания шпатлевки от температуры

Влажность, %	Температура, °С	Жизнеспособность, ч	Время высыхания до степени 3, ч
40	16	4,75	5,50
	20	2,63	3,63
	25	1,38	1,67
	30	1,13	1,75
50	16	4,25	6,00
	20	2,33	3,63
	25	1,38	2,63
	30	1,13	1,75
60	16	3,75	7,25
	20	2,63	4,50
	25	1,50	2,75
	30	1,00	2,00
70	16	3,50	7,75
	20	2,63	6,00
	25	1,33	3,50
	30	1,00	2,13
80	16	5,00	8,50
	20	3,25	7,33
	25	1,75	3,75
	30	1,50	2,50

Видно, что чем выше температура, при одном и том же параметре влажности, тем меньше жизнеспособность шпатлевки и быстрее отверждается покрытие.

При отверждении с разницей в температуре окружающей среды 14°C значения жизнеспособности образцов шпатлевки отличаются (при различной влажности) в среднем на 3 ч. При влажности 70 % значение влияния температуры на отверждение меньше, чем при испытаниях с другими параметрами влажности. Минимальное значение жизнеспособности получено при температуре 30°C и влажности 70 %, максимальное – при температуре 16°C и влажности 80 %.

При отверждении покрытий с разницей в температуре окружающей среды 14°C значения времени высыхания до степени 3 образцов шпатлевки отличаются (при различной влажности) в среднем на 4,9 ч. Видно, что при одной и той же температуре образцы шпатлевки быстрее отверждаются при более низкой влажности. Дольше всего покрытие отверждалось при температуре 16°C и влажности 80 %, быстрее всего – при температуре 30°C и влажности 40–50 %.

Такие результаты обусловлены тем, что инициирование радикальной полимеризации происходит при создании в реакционной системе свободных радикалов, способных начать цепные реакции. Термический гомолитический распад инициатора происходит быстрее при более высокой температуре.

На рис. 1 приведены зависимости жизнеспособности и времени высыхания шпатлевки до степени 3 от температуры.

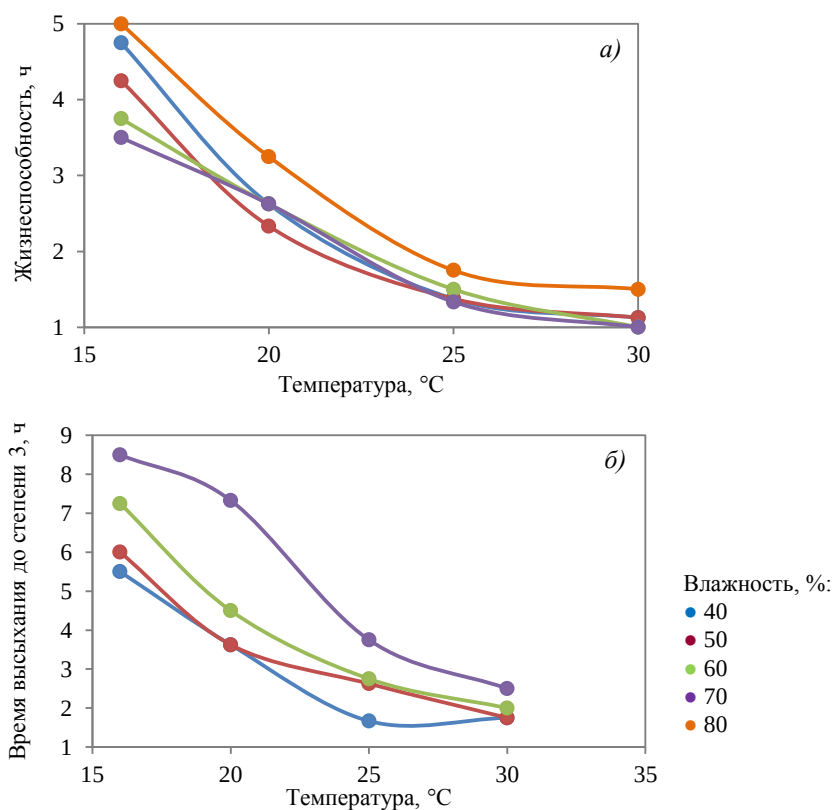


Рис. 1. Температурные зависимости жизнеспособности (а) и времени высыхания шпатлевки до степени 3 (б)

Результаты исследования зависимости жизнеспособности и времени высыхания шпатлевки до степени 3 от влажности представлены в табл. 2. Для исключения параметра температуры испытания проводили при ее различных значениях.

Водяной пар является одним из компонентов окружающего воздуха, но его содержание очень сильно изменяется в зависимости от климатического района. Чем выше температура, тем больше влаги может содержаться в воздухе. В случае понижения температуры избыток влаги будет оседать на поверхности, а в случае повышения температуры начинается процесс испарения воды с поверхности и увеличение ее абсолютного содержания в воздухе.

Таблица 2

Зависимость жизнеспособности и времени высыхания шпатлевки от влажности

Температура, °C	Влажность, %	Жизнеспособность, ч	Время высыхания до степени 3, ч
16	40	4,75	5,50
	50	4,25	6,00
	60	3,75	7,25
	70	3,50	7,75
	80	5,00	8,50
20	40	2,63	3,63
	50	2,33	3,63
	60	2,63	4,50
	70	2,63	6,00
	80	3,25	7,33
25	40	1,38	1,67
	50	1,38	2,63
	60	1,50	2,75
	70	1,33	3,50
	80	1,75	3,75
30	40	1,13	1,75
	50	1,13	1,75
	60	1,00	2,00
	70	1,00	2,13
	80	1,50	2,50

В отличие от температуры влажность окружающей среды не оказывает существенного влияния на жизнеспособность. Например, различие значений жизнеспособности при влажности 40 и 80 % (при температуре 25 °C) достигает всего 22 мин. Влажность оказывает существенное влияние на время высыхания. При температуре 25 °C покрытие, которое отверждалось при влажности 40 %, достигло времени высыхания до степени 3 на 2 ч раньше, чем при влажности 80 %.

При влажности 80 % при разных температурах наблюдаются наибольшие значения жизнеспособности и времени отверждения покрытия. Минимальное время высыхания пленки покрытия до степени 3 достигается при влажности 40 %. Наименьшая жизнеспособность при разных температурах достигается при влажности 70 %.

На рис. 2 приведены зависимости жизнеспособности и времени высыхания шпатлевки до степени 3 от влажности.

Свойства покрытий шпатлевки при отверждении при разных температурах и влажности представлены в табл. 3 и находятся приблизительно на одном уровне. Однако большое влагосодержание (максимальное 70 %) негативно влияет на химические и механические свойства полиэфира и его реакцию с ускорителем, что видно по ухудшению прочности при ударе. При отверждении при большей температуре прочность при ударе становится меньше, а твердость больше. В отвержденных продуктах очень

большое влияние на механические и физические свойства оказывает частота сшивки, т. е. число петель трехмерной сетчатой молекулы, приходящихся на единицу объема. Частота сшивки обуславливает твердость продуктов. Причиной может быть улутучивание стирола во время отверждения, в результате чего меньшее его количество участвует в сшивке, что влечет за собой меньшую эластичность покрытия.

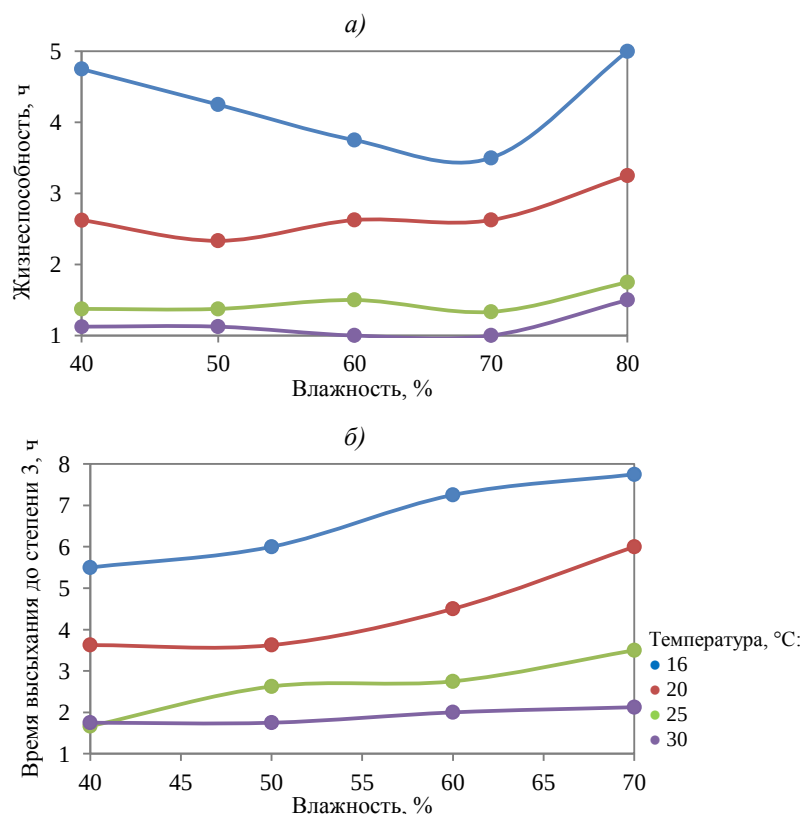


Рис. 2. Зависимости жизнеспособности (а) и времени высыхания шпатлевки до степени 3 от влажности (б)

Таблица 3

Зависимость физико-механических свойств и адгезии от параметров при отверждении покрытий

Влажность, %	Температура, °С	Прочность при ударе, Дж	Твердость, отн. ед.	Адгезия, балл
40	16	5	0,26	0
	20	5	0,28	1
	25	5	0,35	1
	30	4	0,35	0
50	16	5	0,30	0
	20	5	0,30	0
	25	5	0,31	0
	30	5	0,32	0
60	16	5	0,30	0
	20	5	0,27	0
	25	5	0,30	0
	30	4	0,31	1
70	16	4	0,29	1
	20	4	0,29	1
	25	4	0,30	1
	30	3	0,30	0

Заключения

Производители лакокрасочных материалов стремятся к получению продукции с максимальной жизнеспособностью после смешения с отвердителем и к минимальному времени высыхания.

Данная работа проведена для определения влияния температуры и влажности от времени отверждения и жизнеспособности эпоксивинилэфирной шпатлевки при выполнении работ на открытых площадках, чтобы определить, насколько при определенной температуре и влажности снизятся или увеличатся исследуемые свойства.

На отверждение покрытий сильное влияние оказывает температура – чем она выше, тем быстрее отверждается покрытие, однако при температуре 30 °С покрытия обладают меньшей прочностью при ударе и большей твердостью.

Выяснено, что минимальное значение жизнеспособности получено при температуре 30 °С и влажности 70 %, максимальное – при температуре 16 °С и влажности 80 %. Дольше всего покрытие отверждалось при температуре 16 °С и влажности 80 %, быстрее всего – при температуре 30 °С и влажности 40–50 %.

В отличие от температуры влажность окружающей среды не оказывает такого существенного влияния на жизнеспособность. Высокие значения влажности увеличивают жизнеспособность. Среднее различие жизнеспособности (при одинаковых температурах) между значениями влажности 40 и 80 % составляет 20 мин. На время высыхания покрытия влажность влияет существеннее – чем она выше, тем дольше происходит отверждение и тем хуже свойства покрытия.

Оптимальной температурой и влажностью для отверждения эпоксивинилэфирной шпатлевки являются соответственно 25 °С и 60 %, при этих показателях – лучшая разница в значениях жизнеспособности и времени высыхания, при этом физико-механические свойства шпатлевки после отверждения находятся на высоком уровне.

Список источников

1. Каблов Е.Н. Авиационное материаловедение: итоги и перспективы // Вестник Российской академии наук. 2002. Т. 72. № 1. С. 3–12.
2. Каблов Е.Н. Конструкционные и функциональные материалы – основа экономического и научно-технического развития России // Вопросы материаловедения. 2006. № 1. С. 64–67.
3. Каблов Е.Н. Авиационное материаловедение в XXI веке. Перспективы и задачи // Авиационные материалы. Избранные труды ВИАМ 1932–2002. М.: МИСИС–ВИАМ, 2002. С. 23–47.
4. Ткачук А.И., Загора А.Г., Донецкий К.И., Евдокимов А.А. Связующие для полимерных композиционных материалов, применяемых при строительстве быстровозводимых мостовых сооружений // Труды ВИАМ. 2020. № 12 (94). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 21.08.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-12-67-74.
5. Дориомедов М.С. Российский и мировой рынок полимерных композитов (обзор) // Труды ВИАМ. 2020. № 6-7 (89). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.08.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-67-29-37.
6. Сидорина А.И. Мультиаксиальные углеродные ткани в изделиях авиационной техники (обзор). Авиационные материалы и технологии. 2021. № 3 (64). Ст. 10. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 21.08.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-3-105-116.
7. Harish V., Nagaiah N., Niranjana Prabhu T. et al. Preparation and characterization of lead monoxide filled unsaturated polyester based polymer composites for gamma radiation shielding applications // Journal of Applied Polymer Science. 2009. Vol. 112. Is. 3. P. 1503–1508.
8. Martínez-Barrera G., Villarruel U., Viguera-Santiago E. et al. Compressive strength of gamma-irradiated polymer concrete // Polymer Composites. 2008. Vol. 29. Is. 11. P. 1210–1217.
9. Кучеренко Е.В., Щербаков А.С., Арзамасцев С.В. Композиционные материалы на основе полиэфирной смолы // Современные инновации. 2016. № 3 (5). С. 5–7.

10. Ткачук А.И., Терехов И.В., Гуревич Я.М., Григорьева К.Н. Исследования влияния природы модифицирующих добавок на реологические и термомеханические характеристики фотополимерной композиции на основе эпоксивинилэфирной смолы // *Авиационные материалы и технологии*. 2019. № 3 (56). С. 31–40. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-31-40.
11. Cook M.I., Dubowik D.A., Walker F.H. Improved high solids epoxy paints with new curing agents // *Fabre und Lack*. 2000. Vol. 106 (4). P. 28–43.
12. Брок Т., Гротэклаус М., Мишке П. Ненасыщенные полиэферы // *Европейское руководство по лакокрасочным материалам и покрытиям*. М.: Пэйн-Медиа, 2007. С. 73–78.
13. Серцова А.А., Королева М.Ю., Юртов Е.В. и др. Огнестойкие полимерные нанокомпозиты на основе оксидов и гидроксидов металлов // *Химическая технология*. 2009. Т. 10. № 12. С. 706–712.
14. Pravednikova O.B., Dutikova O.S., Karelina I.M. et al. Effect of nano-sized metal compounds on the flameproof properties of plasticized polyvinyl chloride // *Fiber Chemistry*. 2009. Vol. 41 (2). P. 80–84.
15. Начаркина А.В., Зеленина И.В., Валуева М.И., Барботько С.Л. Пожаробезопасность высокотемпературных углепластиков авиационного назначения (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2022. № 7 (113). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 26.08.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-7-134-150.
16. Сорокина Т.Г., Поляков Д.К., Коробко А.П., Пенская Т.В. Винилэфирные смолы для пултрузионной технологии // *Электротехника*. 2002. № 4. С. 49–51.
17. Li P., Yu Y., Yang X. Effects of initiators on the cure kinetics and mechanical properties of vinyl ester resins // *Journal of Applied Polymer Science*. 2008. Vol. 109. Is. 4. P. 2539–2545.
18. Garay A., Paese L., Souza J., Amico S. Studies on thermal and viscoelastic properties of vinyl ester resin and its composites with glass fiber // *Matéria*. 2015. Vol. 20. P. 64–71.
19. Fraga A., Alvarez V., Vazquez A., de La Osa O. Relationship between dynamic mechanical properties and water absorption of unsaturated polyester and vinyl ester glass fiber composites // *Journal of Composite Materials*. 2003. Vol. 37. P. 1553–1574.
20. Zhang J., Richardson M. Micro-heterogeneity of urethane vinylester resin networks // *Polymer*. 2000. Vol. 41. Is. 18. P. 6843–6849.
21. Бородина И.А., Козик В.В., Борода Л.П. Влияние природных силикатов на отверждение ненасыщенных полиэфирных смол // *Известия Томского политехнического университета*. 2005. Т. 308. № 3. С. 118–122.
22. Дильмиев В.В., Онина С.А. Особенности модификации ненасыщенных полиэфирных смол на примере ортофталевой // *Вестник науки*. 2024. Т. 4. № 5 (74). С. 1805–1808.

References

1. Kablov E.N. Aviation Materials Science: Results and Prospects. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*, 2002, vol. 72, no. 1, pp. 3–12.
2. Kablov E.N. Structural and Functional Materials – the Basis of Economic and Scientific-Technical Development of Russia. *Voprosy materialovedeniya*, 2006, no. 1, pp. 64–67.
3. Kablov E.N. Aviation Materials Science in the 21st Century. Prospects and Tasks. *Aviation Materials. Selected Works of VIAM 1932–2002*. Moscow: MISiS–VIAM, 2002, pp. 23–47.
4. Tkachuk A.I., Zagora A.G., Donetsk K.I., Evdokimov A.A. Polymeric matrixes for composite materials used in the construction of quickly built bridge structures. *Trudy VIAM*, 2020, no. 12 (94), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 21, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-12-67-74.
5. Doriomedov M.S. Russian and world market of polymer composites (review). *Trudy VIAM*, 2020, no. 6–7 (89), paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 20, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-67-29-37.
6. Sidorina A.I. Multiaxial carbon fabrics in the products of aviation technology (review). *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 3 (64), paper no. 10. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: August 21, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-3-105-116.

7. Harish V., Nagaiah N., Niranjana Prabhu T. et al. Preparation and characterization of lead monoxide filled unsaturated polyester based polymer composites for gamma radiation shielding applications. *Journal of Applied Polymer Science*, 2009, vol. 112, is. 3, pp. 1503–1508.
8. Martínez-Barrera G., Villarruel U., Viguera-Santiago E. et al. Compressive strength of gamma-irradiated polymer concrete. *Polymer Composites*, 2008, vol. 29, is. 11, pp. 1210–1217.
9. Kucherenko E.V., Shcherbakov A.S., Arzamastsev S.V. Composite materials based on polyester resin. *Sovremennye innovatsii*, 2016, no. 3 (5), pp. 5–7.
10. Tkachuk A.I., Terekhov I.V., Gurevich Ya.M., Grigoreva K.N. Research of the influence of the modifying additives nature on the rheological and thermomechanical properties of a photopolymer composition based on epoxy vinyl ester resin. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 3 (56), pp. 31–40. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-31-40.
11. Cook M.I., Dubowik D.A., Walker F.H. Improved high solids epoxy paints with new curing agents. *Fabre und Lack*, 2000, vol. 106 (4), pp. 28–43.
12. Brock T., Groteklaus M., Mischke P. Unsaturated polyesters. *European Guide to Paints and Coatings*. Moscow: Paint-Media, 2007, pp. 73–78.
13. Sertsova A.A., Koroleva M.Yu., Yurtov E.V. et al. Fire-resistant polymer nanocomposites based on metal oxides and hydroxides. *Khimicheskaya tekhnologiya*, 2009, vol. 10, no. 12, pp. 706–712.
14. Pravednikova O.B., Dutikova O.S., Karelina I.M. et al. Effect of nano-sized metal compounds on the flameproof properties of plasticized polyvinyl chloride. *Fiber Chemistry*, 2009, vol. 41 (2), pp. 80–84.
15. Nacharkina A.V., Zelenina I.V., Valueva M.I., Barbotko S.L. Fire safety of high-temperature carbon fiber reinforced plastics for aviation purposes (review). *Trudy VIAM*, 2022, no. 7 (113), paper no. 12. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 26, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-7-134-150.
16. Sorina T.G., Polyakov D.K., Korobko A.P., Penskaya T.V. Vinyl ester resins for pultrusion technology. *Elektrotehnika*, 2002, no. 4, pp. 49–51.
17. Li P., Yu Y., Yang X. Effects of initiators on the cure kinetics and mechanical properties of vinyl ester resins. *Journal of Applied Polymer Science*, 2008, vol. 109, is. 4, pp. 2539–2545.
18. Garay A., Paese L., Souza J., Amico S. Studies on thermal and viscoelastic properties of vinyl ester resin and its composites with glass fiber. *Matéria*, 2015, vol. 20, pp. 64–71.
19. Fraga A., Alvarez V., Vazquez A., de La Osa O. Relationship between dynamic mechanical properties and water absorption of unsaturated polyester and vinyl ester glass fiber composites. *Journal of Composite Materials*, 2003, vol. 37, pp. 1553–1574.
20. Zhang J., Richardson M. Micro-heterogeneity of urethane vinylester resin networks. *Polymer*, 2000, vol. 41, is. 18, pp. 6843–6849.
21. Borodina I.A., Kozik V.V., Borilo L.P. Effect of natural silicates on the curing of unsaturated polyester resins. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*, 2005, vol. 308, no. 3, pp. 118–122.
22. Dilmiev V.V., Onina S.A. Features of modification of unsaturated polyester resins on the example of orthophthalic. *Vestnik nauki*, 2024, vol. 4, no. 5 (74), pp. 1805–1808.

Информация об авторах

Марченко Сергей Андреевич, инженер 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Скирко Полина Владимировна, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Sergei A. Marchenko, First Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Polina V. Skivko, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 17.09.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 20.09.2024.

The article was submitted 17.09.2024; approved and accepted for publication after reviewing 20.09.2024.

Научная статья

УДК 620.1:678.8

DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-10-94-108

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ УГЛЕПЛАСТИКА С ПОКРЫТИЯМИ ПОСЛЕ 8 И 13 ЛЕТ СТАРЕНИЯ В УМЕРЕННО ТЕПЛОМ КЛИМАТЕ Часть 1. Влагосодержание и коэффициенты диффузии влаги

О.В. Старцев^{1,2}, Т.В. Коваль¹, А.С. Кротов², Е.В. Двирная¹, И.М. Велигодский¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова Сибирского отделения Российской академии наук, Якутск, Россия; administration@iptpn.ysn.ru

Аннотация. Углепластик КМКУ-2м.120, защищенный фторэпоксидным (ВЭ-46) и акрилстирольным (АС-1115) покрытиями, экспонировали в открытых условиях умеренно теплого климата г. Геленджика в течение 8 и 13 лет. Исследована кинетика влагопереноса состаренных образцов углепластика. Значения относительного изменения массы образцов разных форм и размеров аппроксимированы одномерными и трехмерными моделями Фика и Ленгмюра. Определено влияние типа и цвета покрытия, продолжительности климатического воздействия на влагосодержание и коэффициенты диффузии влаги в плоскости армирования и трансверсальном направлении.

Ключевые слова: углепластик, фторэпоксидное покрытие, акрилстирольное покрытие, климатическое старение, сушка, увлажнение, влагоперенос, анизотропия

Для цитирования: Старцев О.В., Коваль Т.В., Кротов А.С., Двирная Е.В., Велигодский И.М. Исследование свойств углепластика с покрытиями после 8 и 13 лет старения в умеренно теплом климате. Часть 1. Влагосодержание и коэффициенты диффузии влаги // Труды ВИАМ. 2024. № 10 (140). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-10-94-108.

Scientific article

INVESTIGATION OF THE PROPERTIES OF CARBON FIBER REINFORCED PLASTIC WITH COATINGS AFTER 8 AND 13 YEARS OF WEATHERING IN MODERATELY WARM CLIMATE Part 1. Moisture content and diffusion coefficients

O.V. Startsev^{1,2}, T.V. Koval¹, A.S. Krotov², E.V. Dvirnaya¹, I.M. Veligodsky¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

²V.P. Laronov Institute of the Physical-Technical Problems of the North, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences Federal state Budgetary Institution of Science, Yakutsk, Russia; administration@iptpn.ysn.ru

Abstract. Carbon fiber reinforced plastic (CFRP) KMKU-2m.120, protected by fluoroepoxide VE-46 and acrylic AC-1115 coatings, was exposed to natural weathering conditions in the moderately warm climate of Gelendzhik for 8 and 13 years of exposure. The moisture transfer kinetics in aged CFRP is studied. Fick and Langmuir one-dimensional and three-dimensional models were used to fit the experimental data: the relative change in the mass of samples of different shapes and sizes. The influence of the coating type and color, duration of natural weathering on moisture content and moisture diffusion coefficients (in-plane and transverse directions) was studied.

Keywords: carbon fiber reinforced plastic, fluoroepoxide coating, acrylic coating, natural weathering, drying, moistening, moisture diffusion, anisotropy

For citation: Startsev O.V., Koval T.V., Krotov A.S., Dvirnaya E.V., Veligodsky I.M. Investigation of the properties of carbon fiber reinforced plastic with coatings after 8 and 13 years of weathering in moderately warm climate. Part 1. Moisture content and diffusion coefficients. Trudy VIAM, 2024, no. 10 (140), paper no. 09. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-10-94-108.

Введение

В современном авиастроении углепластики на основе эпоксидных матриц относятся к наиболее востребованным полимерным композиционным материалам (ПКМ) [1, 2]. Они наиболее устойчивы к воздействию агрессивных факторов внешней среды [3]. Однако углепластики подвержены старению, в результате которого их свойства необратимо ухудшаются [4–6].

В инженерной практике нередко возникает необходимость определения состояния длительно работающих элементов авиационной техники, изготовленных из ПКМ, для установления возможности продолжения дальнейшей безопасной эксплуатации. В этом случае выполняются следующие действия:

- в соответствии с рекомендациями работ [3, 6–9] измеряются необходимые механические и физические показатели материала R_t из состава конструктивного элемента после периода эксплуатации продолжительностью t ;
- подтверждается, что показатели R_t находятся в области значений, допустимых для эксплуатации;
- назначается дополнительный период эксплуатации конструктивного элемента τ ;
- после достижения периода τ измеряются аналогичные показатели материала $R_{t+\tau}$;
- сравниваются значения R_t и $R_{t+\tau}$, проверяется справедливость общей закономерности, согласно которой на поздних этапах старения показатели R линейно снижаются [10];
- в зависимости от полученных результатов принимается решение о возможности и продолжительности дальнейшей эксплуатации материала.

Целесообразность такого подхода применительно к углепластикам подтверждена результатами многочисленных исследований [3–6]. Например, предел прочности при изгибе σ_b эпоксидного углепластика после 12 лет климатического воздействия изменялся в 6,9 раза медленнее, чем на начальном этапе [11]. Моделирование долговечности углепластиков в работах [12, 13] также основано на квазилинейном изменении показателей R на поздних этапах климатического старения.

Обычно для оценки старения ПКМ выбирают пределы прочности и модули упругости при растяжении (σ_b , E_t), сжатии (σ_c , E_c), изгибе (σ_b , E_b) и сдвиге (σ_s , G) [3–6, 14]. Однако для композитов с умеренно гидрофильными термореактивными матрицами при контроле стойкости к влаге часто исследуется кинетика влагопереноса в режимах сушки или в стационарных термовлажностных условиях [15–17]. Для вычисления коэффициента диффузии влаги D и относительного влагосодержания w применяют второй закон Фика [18]. Если влагоперенос имеет нелинейный характер, связанный с подвижностью молекул мобильной и связанной воды, то используют модель Ленгмюра [19].

Показатели влагопереноса в углепластиках изменяются в широких пределах [20]. Приведенные в табл. 1 примеры показывают зависимость D и w углепластиков от состава и пористости полимерной матрицы [15], состояния и обработки поверхности углеродного волокна, схемы армирования, режимов прессования [10], температуры и относительной влажности воздуха, продолжительности пребывания в воде или влажной среде и других факторов.

Таблица 1

Относительное влагосодержание (w) и коэффициенты диффузии влаги (D) углепластиков после термовлажностных и климатических воздействий

Углепластик	Условия испытаний	w , %	D , мм ² /сут	Литературный источник
Pyrofil TR50S/K51	100 сут в воде, 90 °C	1,3	0,36	[21]
Квазиизотропный эпоксидный	365 сут в морской воде, 30 °C	0,83	0,0028	[22]
	365 сут, 30 °C, $\phi = 70$ %	0,64	0,0012	
CF EL2 pultruded	112 сут в воде, 60 °C	1,2	0,026	[23]
CF Elium150/CY50	365 сут в морской воде, 60 °C	0,80	0,18	[24]
TG800/E207 [0] ₁₆	8 сут, 80 °C, $\phi = 90$ %	0,25	0,0018	[25]
TG800/E207 [90] ₁₆		0,20	0,0014	
T300/Epicote 135	35 сут в морской воде, 60 °C	1,1	0,041	[26]
Однонаправленный эпоксидный	500 сут, 70 °C, $\phi = 85$ %	1,1	0,14; 0,060; 0,020*	[27]
Ероху IN2 [0, 90]	120 сут в воде, 20 °C	0,8	0,00076	[28]
T300/5208	196 сут, 49 °C, $\phi = 100$ %	1,3	0,056	[29]
	500 сут, 70 °C, $\phi = 100$ %	1,4	0,14	
Ероху molded prepreg	60 сут в воде, 30 °C	0,67	0,0048	[30]
	60 сут в воде, 55 °C	1,3	0,0062	
	40 сут в воде, 80 °C	3,3	0,0091	
Tenax UTS 5631/EPR 4434 tendonse	1710 сут в воде, 20 °C	1,1	0,79	[31]
	1710 сут в воде, 60 °C		2,2	
Ероху UD pultruded	60 сут в воде, 60 °C	0,50	0,059	[32]
977-2 UD	144 сут, 70 °C, $\phi = 85$ %	0,60	0,058	[33]
IM7/8552 [0] ₁₆	135 сут, 70 °C, $\phi = 85$ %	0,39	0,035	[34]
IM7/8552 [± 45 , 0, 90] ₂₅		0,35	0,030	
UD134/AS-4/HexPly 8552	120 сут, 60 °C, $\phi = 85$ %	1,2	0,15	[35]
	180 сут климатического старения		0,24	
ВКУ-39	60 сут, 60 °C, $\phi = 100$ %	1,2	0,024; 0,044; 0,0016*	[36]
	60 сут, 60 °C, $\phi = 100$ % после 3 лет экспонирования на открытом стенде в г. Геленджике	1,1	0,017; 0,022; 0,0021*	

* Коэффициенты диффузии влаги в направлении длины (D_L), ширины (D_W) и толщины (D_H) образца.

Лишь в единичных исследованиях [27, 36] выявлены значения коэффициента диффузии влаги в трансверсальном направлении D_z , которые в разы или даже на порядки ниже соответствующих значений D_x , D_y в плоскости армирования пластин и наиболее важны для характеристики эксплуатационной стойкости крупногабаритных деталей из ПКМ.

Сорбция влаги сопровождается набуханием [6], пластификацией [17], гидролизом [11] и структурной релаксацией [37] полимерных матриц. Особый интерес представляют выявленные изменения показателей D и w при климатическом старении углепластиков [25, 36].

В работах [38–40] доказана эффективность лакокрасочных покрытий (ЛКП) для сохранения показателей R ПКМ при экспозиции в открытых климатических условиях. По данным работы [38], предел прочности при изгибе стеклопластика, защищенного акриловым покрытием, после 270 сут экспонирования в открытых климатических условиях Канады оказался на 19 % выше, чем показатель σ_b стеклопластика без покрытия.

Пластины стеклопластика на основе винилэфирного связующего испытаны на старение в климатических условиях Японии [39]. Показатели σ_t , σ_b и σ_s после 6 лет

экспозиции снизились на ~26 %. Для тех же пластин, защищенных акрилуретановым покрытием, среднее уменьшение R составило только 6 %. Авторы работы [40] в течение 11 лет выдерживали пултрузионный полиэфирный углепластик на открытом атмосферном стенде в морском климате. Оказалось, что показатель σ_s незащищенных пластин уменьшился на 32 %, а при защите фторсодержащим покрытием – сохранился на исходном уровне.

Несмотря на очевидную актуальность получения новых сведений о старении ПКМ при продолжительном пребывании в открытых климатических условиях [3, 4, 6], в научно-технической литературе отсутствуют сведения о кинетике влагопереноса в состаренных углепластиках, защищенных ЛКП. В связи с этим целью данного исследования является сравнение свойств углепластика на основе клеевого препрега КМКУ-2м.120, защищенного фторэпоксидным (ВЭ-46) и акрилстирольным (АС-1115) покрытиями разного цвета, после 8 и 13 лет экспозиции на открытом стенде в условиях умеренно теплого климата. В первой части работы анализируется влияние ЛКП и продолжительности старения на влагосодержание и коэффициенты диффузии влаги.

Материалы и методы

Для исследований использованы пластины углепластика из клеевого препрега КМКУ-2м.120 (наполнитель – углеродная лента ЭЛУР-П, матрица – эпоксидное связующее ВКС-14-2м), свойства которого рассмотрены в работе [41]. Пластины толщиной 3,3 мм состояли из 23 слоев с укладкой [0, 90]. Показатели R этого материала после 5 лет выдержки в условиях экстремально холодного климата [14] изменились незначительно. Например, значения σ_b , измеренные при температурах 20 и 120 °С, уменьшились всего на 6–9 %.

На поверхность пластин углепластика нанесена эпоксидная грунтовка ЭП-0104 толщиной 25 мкм, а поверх нее – два слоя фторэпоксидной эмали ВЭ-46 [42] или акрилстирольной эмали АС-1115 [43] общей толщиной 95±5 мкм. Результаты изучения атмосферостойкости данных ЛКП представлены в работах [44, 45].

Пластины углепластика экспонировали 8 и 13 лет на открытых стендах в умеренно теплом климате г. Геленджика, метеорологические показатели которого представлены в работе [46]. Исследовано состояние 10 пластин углепластика КМКУ-2м.120 (табл. 2). Внешний вид и цветовые характеристики ЛКП после климатического воздействия будут подробно проанализированы во второй части статьи.

Таблица 2

Характеристики пластин углепластика КМКУ-2м.120

Марка лакокрасочного покрытия	Цвет лакокрасочного покрытия	Обозначение пластины углепластика	Продолжительность экспозиции, лет
Без покрытия	–	Г0	8
ВЭ-46	Светло-серый	Г1	13
	Серо-голубой	Г2	8
	Изумрудный	Г3	
	Голубой	Г4	13
	Темно-зеленый	Г5	
	Красный	Г6	8
АС-1115	Оранжевый	Г7	13
	Желтый	Г8	8
	Синий	Г9	

Для исследования влагопереноса с повышенной достоверностью из каждой пластины углепластика вырезали с помощью фрезерного станка по 25 образцов длиной 100; 50; 25; 10 мм и шириной 100; 50; 25; 10 мм. Используя эти наборы, исследовали два режима влагопереноса. Сначала образцы сушили при температуре 60 °С в течение

175 сут в емкостях над прокаленным силикагелем. Затем просушенные образцы выдержали в закрытых эксикаторах над поверхностью воды при относительной влажности воздуха $\varphi = 98 \pm 2 \%$ в течение 65 сут. Массу образцов измерили на аналитических весах с погрешностью 0,1 мг. По результатам этих измерений определили величину относительного влагосодержания $w(t) = (m_t - m_0)/m_0$, где m_t – масса материала в момент времени t ; m_0 – масса материала в начальный момент времени.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Результаты, моделирование и обсуждение

Накопленный массив данных об изменении массы 225 образцов углепластика КМКУ-2м.120 с ЛКП и 16 контрольных образцов этого композита без защитного покрытия (85458 значений) использован для выявления особенностей влагопереноса. Характерные примеры стадий сушки и увлажнения образцов представлены на рис. 1.

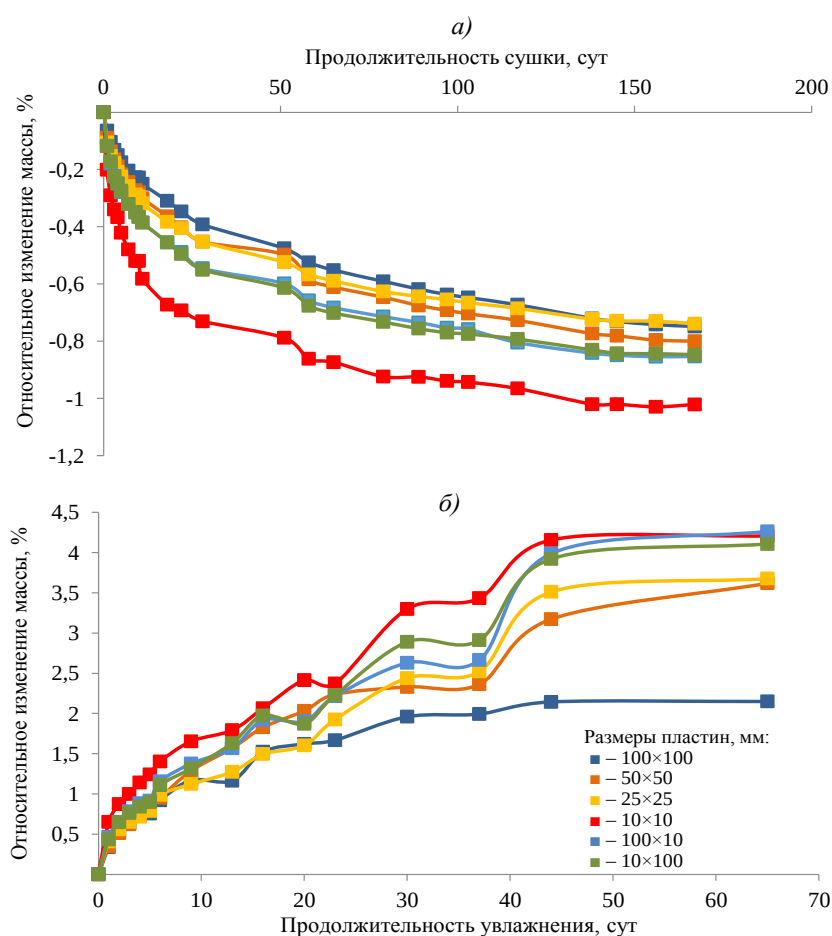


Рис. 1. Кинетика сушки (а) и увлажнения (б) образцов пластины Г4 с покрытием ВЭ-46 после 13 лет экспозиции

Прослеживаются хорошо выраженные различия зависимостей $w(t)$ от формы и размеров образцов, что является признаком анизотропии влагопереноса. На стадии сорбции поглощается существенно больше влаги, чем при сушке. Подобные кинетические кривые выявлены и для образцов углепластика, вырезанных из пластины Г0 без защитного покрытия после 8 лет натурных испытаний (рис. 2).

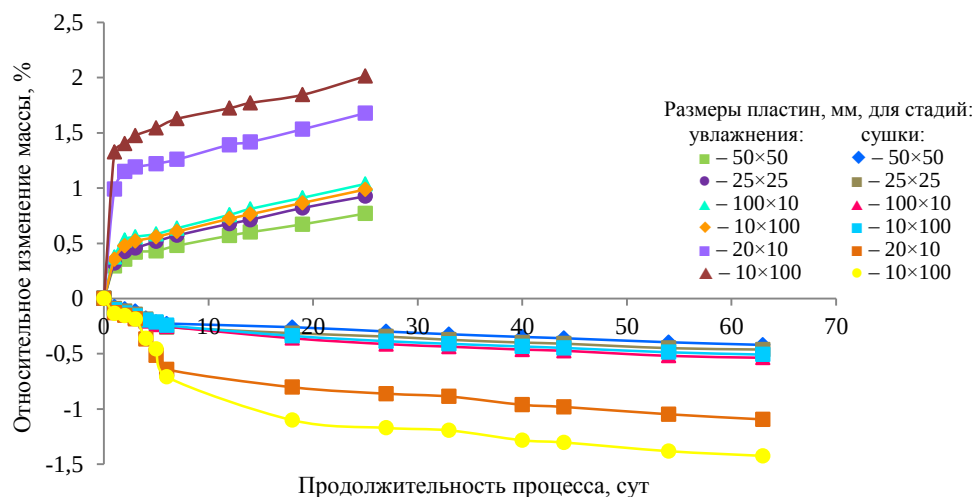


Рис. 2. Кинетика сушки и увлажнения образцов пластины Г0 без защитного покрытия после 8 лет экспозиции

Для аппроксимации кинетических кривых использовали модели Фика и Ленгмюра в одномерном и трехмерном приближениях (табл. 3). Математическая обработка результатов эксперимента проведена с помощью программного обеспечения FITTER [47].

Таблица 3

Модели для аппроксимации десорбции влаги из углепластика КМКУ-2м.120 с покрытиями ВЭ-46 и АС-1115

Условный номер	Обозначение	Формула	Описание
1	f1d	$w_{f1d}(t) = w_0(1 - 8\text{SUM}_r);$ $\text{SUM}_r = \sum_{r=0}^{\infty} \frac{\exp(-n_r^2 d_r t)}{n_r^2},$ $d_r = D_r / R_f^2, n_r = \pi(2r + 1), r = R; f = 1;$ $\frac{1}{R^2} = \frac{1}{L^2} + \frac{1}{W^2} + \frac{1}{H^2}$	Одномерный 2-й закон Фика с постоянными параметрами [18]
2	fl1d	$w_{fl1d}(t) = \frac{\beta}{\gamma + \beta} w_{f1d}(t) + w_0 \left(1 - \frac{\gamma}{\gamma + \beta} \exp(-\beta t) - \frac{\beta}{\gamma + \beta} \right);$ $w_{f1d}(t) = w_0(1 - 8\text{SUM}_r)$	Одномерная модель Ленгмюра с постоянными параметрами [19]
3	f3d	$w_{f3d}(t) = w_0(1 - 512\text{SUM}_x\text{SUM}_y\text{SUM}_z);$ $\text{SUM}_r = \sum_{r=0}^{\infty} \frac{\exp(-n_r^2 d_r t)}{n_r^2},$ $d_r = D_r / R_f^2, n_r = \pi(2r + 1), r = x, y, z, f = 1, 2, 3$	Трехмерный 2-й закон Фика с постоянными параметрами [18]
4	fl3d	$w_{fl3d}(t) = \frac{\beta}{\gamma + \beta} w_{f3d}(t) + w_0 \left(1 - \frac{\gamma}{\gamma + \beta} \exp(-\beta t) - \frac{\beta}{\gamma + \beta} \right);$ $w_{f3d}(t) = w_0(1 - 512\text{SUM}_x\text{SUM}_y\text{SUM}_z)$	Трехмерная модель Ленгмюра с постоянными параметрами [20, 46]

Примечание. D – коэффициент диффузии влаги; w – относительное влагосодержание; x, y, z – координаты, вдоль которых диффундирует влага; L, W, H – геометрические размеры образца; t – продолжительность процесса; D_i – компоненты коэффициента диффузии вдоль основных направлений $i = \{x, y, z\}$; β – вероятность в единицу времени превращения связанной воды в мобильную; γ – вероятность в единицу времени превращения мобильной воды в связанную.

На рис. 3 представлены примеры результатов моделирования кинетики влагопереноса образцов пластин Г1 (с покрытием ВЭ-46) и Г7 (с покрытием АС-1115) размером 100×100 мм после 13 лет старения с помощью одномерных моделей f1d и fl1d на стадиях сушки и увлажнения. Модели 1 и 2 с высокой точностью (коэффициент детерминации $R^2 \geq 0,98$) справедливы для пластин с покрытием ВЭ-46 на стадиях сушки и сорбции. Для углепластика КМКУ-2м.120 с акрилстирольным покрытием модели 1 и 2 также точно аппроксимируют зависимости $w(t)$, но на стадии увлажнения ошибки аппроксимации возрастают.

Показатели моделей 1–4, усредненные по видам покрытий, для стадий сушки и увлажнения представлены в табл. 4 и 5.

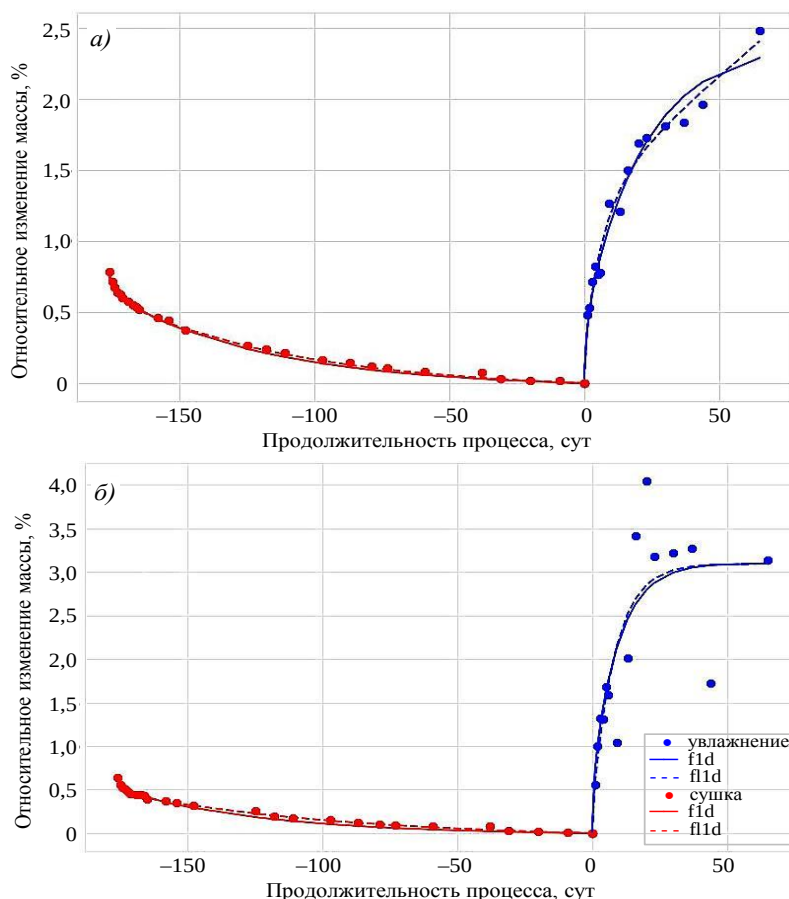


Рис. 3. Моделирование кинетики влагопереноса образцов пластин Г1 (а) и Г7 (б) размером 100×100 мм после 13 лет старения с помощью одномерных моделей f1d и fl1d на стадиях сушки и увлажнения

Если не учитывать анизотропию влагопереноса, то одномерные модели 1 и 2 показывают 2–3-кратное снижение коэффициента диффузии влаги на стадии сушки для образцов, защищенных фторэпоксидным покрытием. При этом показатель $D = 0,038 \text{ мм}^2/\text{сут}$ при защите покрытием ВЭ-46 одинаков после 8 и 13 лет старения, что является признаком высокой климатической стойкости и эффективности защиты фторэпоксидного покрытия при длительных сроках климатического воздействия. Аналогичную стабильность показателя D для акрилстирольного ЛКП демонстрирует табл. 4. Однако, по данным модели Ленгмюра, покрытие АС-1115 вызывает увеличение показателя D в 2–2,5 раза. Вычисления по модели 2 показывают, что незащищенный углепластик после 8 лет пребывания в открытых климатических условиях накапливает во внутренних слоях в 2–3 раза больше влаги, чем при использовании ЛКП.

Таблица 4

Показатели моделей 1–4, использованных для аппроксимации десорбции влаги из углепластика КМКУ-2м.120 без покрытия и с покрытиями ВЭ-46, АС-1115

Условный номер (обозначение) модели	Показатели модели	Средние значения показателей модели для углепластика с покрытием					
		без покрытия	ВЭ-46		АС-1115		
			при экспозиции в течение, лет				
			8	8	13	8	13
1 (f1d)	$w_0, \%$	0,673	0,690	0,760	0,600	0,700	
	$D, \text{мм}^2/\text{сут}$	0,132	0,038	0,038	0,043	0,050	
	R^2	0,975	0,978	0,980	0,961	0,965	
2 (fl1d)	$w_0, \%$	2,03	1,00	0,83	0,67	0,78	
	$D, \text{мм}^2/\text{сут}$	0,529	0,300	0,280	1,300	1,100	
	$\beta, \text{сут}^{-1}$	0,025	0,016	0,016	0,018	0,015	
	$\gamma, \text{сут}^{-1}$	>0,200	0,030	0,030	0,031	0,028	
	R^2	0,990	0,997	0,996	0,991	0,993	
3 (f3d)	$w_0, \%$	1,66	0,75	0,85	0,66	0,78	
	$D_L, \text{мм}^2/\text{сут}$	0,039	0,120	0,160	0,180	0,120	
	$D_W, \text{мм}^2/\text{сут}$	0,070	0,120	0,068	0,140	0,200	
	$D_H, \text{мм}^2/\text{сут}$	<0,0010	0,0087	0,0095	0,0100	0,0081	
	R^2	0,7820	0,9690	0,9380	0,9400	0,9020	
4 (fl3d)	$w_0, \%$	1,62	0,81	0,90	0,74	0,89	
	$D_L, \text{мм}^2/\text{сут}$	0,039	0,072	0,180	0,062	0,052	
	$D_W, \text{мм}^2/\text{сут}$	0,071	0,071	0,051	0,050	0,075	
	$D_H, \text{мм}^2/\text{сут}$	<0,0010	0,0058	0,0072	0,0053	0,0036	
	$\beta, \text{сут}^{-1}$	0,17	0,40	0,18	0,59	0,63	
	$\gamma, \text{сут}^{-1}$	0,0024	0,0500	0,0230	0,1100	0,1100	
	R^2	0,784	0,975	0,942	0,956	0,916	

Таблица 5

Показатели моделей 1–4, использованных для аппроксимации сорбции влаги из углепластика КМКУ-2м.120 без покрытия и с покрытиями ВЭ-46, АС-1115

Условный номер (обозначение) модели	Показатели модели	Средние значения показателей модели для углепластика с покрытием				
		без покрытия	ВЭ-46		АС-1115	
			при экспозиции в течение, лет			
			8	8	13	8
1 (f1d)	$w_0, \%$	1,0	3,5	4,2	7,7	8,5
	$D, \text{мм}^2/\text{сут}$	0,710	0,044	0,035	0,043	0,017
	R^2	0,932	0,943	0,971	0,783	0,784
2 (fl1d)	$w_0, \%$	4,5	5,1	7,1	8,5	9,0
	$D, \text{мм}^2/\text{сут}$	2,90	9,20	0,72	>9,00	>9,00
	$\beta, \text{сут}^{-1}$	0,037	0,037	0,017	0,029	0,020
	$\gamma, \text{сут}^{-1}$	0,028	0,310	0,099	>0,800	0,360
	R^2	0,997	0,953	0,982	0,812	0,821
3 (f3d)	$w_0, \%$	1,3	4,1	4,2	7,8	7,5
	$D_L, \text{мм}^2/\text{сут}$	0,5800	0,0360	0,0530	0,0160	0,0086
	$D_W, \text{мм}^2/\text{сут}$	2,1000	0,0590	0,0560	0,0150	0,0048
	$D_H, \text{мм}^2/\text{сут}$	0,0099	0,0160	0,0140	0,0070	0,0086
	R^2	0,695	0,911	0,948	0,728	0,712
4 (fl3d)	$w_0, \%$	1,60	0,81	5,00	0,74	>10,00
	$D_L, \text{мм}^2/\text{сут}$	0,130	0,098	0,560	0,034	0,040
	$D_W, \text{мм}^2/\text{сут}$	0,220	0,170	0,290	0,110	0,017
	$D_H, \text{мм}^2/\text{сут}$	<0,0010	0,0090	0,0100	0,0043	0,0026
	$\beta, \text{сут}^{-1}$	>0,5000	0,0600	0,0530	0,0092	0,0120
	$\gamma, \text{сут}^{-1}$	>0,800	0,033	0,021	0,025	0,021
	R^2	0,751	0,917	0,954	0,745	0,731

Важные результаты получены при обработке данных на стадии сушки трехмерными моделями (табл. 4). Несмотря на достаточно высокую погрешность аппроксимации для образцов без защиты ($R^2 = 0,78$), выявлена очевидная анизотропия влагопереноса, подобная описанной в работах [27, 36]. Коэффициент диффузии влаги в трансверсальном направлении D_H для незащищенных образцов углепластика в 40–70 раз меньше, чем для компонентов тензора диффузии в плоскости армирования (D_L, D_w). Эта закономерность прослеживается и для пластин, защищенных ЛКП: отмечена разница в 12–25 раз.

Если использовать максимальное влагосодержание и коэффициент диффузии влаги при сушке как критерии старения углепластика КМКУ-2м.120 с защитными ЛКП, то можно сделать вывод об очевидной стабильности этих показателей за пятилетний период между 8 и 13 годами климатического воздействия.

Результаты моделирования диффузии влаги на стадии увлажнения (табл. 5) также дали ценную информацию о поведении защитных покрытий при старении углепластика. Влажный воздух ($\phi = 98 \pm 2 \%$) при температуре 60°C оказался чрезвычайно активной средой, вызвавшей ускоренное старение ЛКП. Вода в жидком состоянии накопилась в пространстве между грунтовкой и эмалями в пузырьках, легко разрушающихся при слабом механическом воздействии. На рис. 4 показаны поверхности покрытия АС-1115 после 65 сут увлажнения.



Рис. 4. Внешний вид покрытия АС-1115 на поверхности образцов пластин Г7 (а), Г8 (б) и Г9 (в) после 65 сут увлажнения

При моделировании влагопереноса на стадии увлажнения все четыре модели показали увеличение показателя w_0 до 7,5–10 %. Очевидно, что такое количество влаги не проникло в объем углепластика, а осталось в слое ЛКП. По этой причине для углепластика с акрилстирольным покрытием модели Фика и Ленгмюра продемонстрировали большие погрешности ($R^2 = 0,74 \pm 0,04$). Фторэпоксидное покрытие проявило более высокую стойкость к термовлажностному старению, особенно после 8 лет климатического воздействия (табл. 5).

Таким образом, стадию увлажнения при влажности $98 \pm 2 \%$ и температуре 60°C можно использовать для оценки состояния ЛКП на поверхности конструктивных элементов, изготовленных из углепластика, после различных периодов пребывания в натуральных климатических условиях.

Заключения

Нанесенные на поверхность углепластиков ЛКП повышают их стойкость к климатическому старению как по механическим показателям, так и по характеристикам влагопереноса.

Для выявления эффективности защитных свойств ЛКП из состаренных пластин целесообразно вырезать образцы разных форм и размеров, измерить их массу при выдержке сначала в сухом, а потом во влажном воздухе при температуре 60 °С. Стадии сушки и увлажнения должны длиться ≥ 60 сут.

Результаты взвешивания необходимо аппроксимировать одномерными и трехмерными моделями Фика и Ленгмюра для всей совокупности образцов разных форм и размеров, чтобы с высокой достоверностью прогнозировать влагосодержание и коэффициенты диффузии в плоскости армирования и трансверсальном направлении.

Результаты моделирования показали, что для образцов углепластика без ЛКП коэффициент диффузии влаги в трансверсальном направлении в 40–70 раз меньше, чем для компонентов тензора диффузии в плоскости армирования. Эта закономерность сохраняется при использовании ЛКП.

Незащищенный углепластик после 8 и 13 лет пребывания в открытых климатических условиях накапливает во внутренних слоях в 2–3 раза больше влаги, чем при использовании ЛКП. При этом фторэпоксидное покрытие более стойко к атмосферному старению, чем акрилстирольное.

Термовлажностное воздействие при влажности 98 ± 2 % и температуре 60 °С на климатически состаренный углепластик можно использовать как эффективную методику оценки состояния ЛКП на поверхности композита после различных периодов климатического воздействия.

Во второй части данной статьи будут представлены результаты исследования пластифицирующего действия влаги на ЛКП состаренного углепластика, полученные методом динамического механического анализа.

Данная работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда № 24-19-00009, <https://rscf.ru/project/24-19-00009/>.

Список источников

1. Irving P., Soutis C. Polymer composites in the aerospace industry. 2nd ed. Cambridge: Woodhead Publishing, 2019. 688 p.
2. Старцев В.О., Антипов В.В., Славин А.В., Горбовец М.А. Современные отечественные полимерные композиционные материалы для авиастроения (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 2 (71). Ст. 10. URL: <https://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 14.03.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
3. Каблов Е.Н., Старцев В.О. Системный анализ влияния климата на механические свойства полимерных композиционных материалов по данным отечественных и зарубежных источников (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2018. № 2 (51). С. 47–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-47-58.
4. Tomblin J., Salah L., Hoffman D. Durability and aging of composite aircraft structures // *Long-term durability of polymeric matrix composites*. Boston, MA: Springer US, 2011. P. 513–548.
5. *Авиационные материалы: справочник в 13 т. / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М., 2015. Т. 13: Климатическая и микробиологическая стойкость неметаллических материалов. 270 с.*
6. Каблов Е.Н., Старцев В.О., Лаптев А.Б. Старение полимерных композиционных материалов. М.: НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, 2023. 520 с.
7. Шершак П.В., Яковлев Н.О., Сутубалов А.И. Стандарты по испытаниям полимерных композиционных материалов. Часть 1. Растяжение // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 3 (72). Ст. 12. URL: <https://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 25.04.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-152-166.
8. Шершак П.В., Сутубалов А.И., Яковлев Н.О., Шерстюк Ф.А. Стандарты по испытаниям полимерных композиционных материалов. Часть 2. Сжатие // *Авиационные материалы и технологии*. 2024. № 2 (75). Ст. 12. URL: <https://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 25.04.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-2-149-166.

9. Startsev O.V., Vapirov Y.M., Lebedev M.P., Kychkin A.K. Comparison of glass-transition temperatures for epoxy polymers obtained by methods of thermal analysis // *Mechanics of Composite Materials*. 2020. Vol. 56. P. 227–240. DOI: 10.1007/s11029-020-09875-5.
10. Старцев О.В., Аниховская Л.И., Литвинов А.А., Кротов А.С. Повышение достоверности прогнозирования свойств полимерных композитных материалов при термовлажностном старении // *Доклады академии наук*. 2009. Т. 428. С. 56–60.
11. Kudo A., Ben G. Estimation of weatherability flexural properties for CFRP subjected to long-term outdoor exposure // *18th International Conference on Composite Materials*. Jeju, 2011. Art. W27–3.
12. Yi L., Peng X.Q., Wang Q.F., Yang Y.X. Time-dependent deterioration of carbon fiber reinforced polymer affected by climatic factors // *Advanced Materials Research*. 2012. Vol. 457–458. P. 320–324.
13. Tao L., Min W., Qi L. The hygrothermal aging process and mechanism of CFRP papered by prepreg that may be stored at room temperature // *Polymer Degradation and Stability*. 2020. Vol. 182. P. 109395. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2020.109395.
14. Shvedkova A.K., Petrova A.P., Buznik V.M. Climate resistance of composite materials based on adhesive prepregs under arctic conditions // *Polymer Science. Ser.: D*. 2016. Vol. 9. P. 165–171. DOI: 10.1134/S1995421216020210.
15. Startsev V.O., Il'ichev A.V. Effect of mechanical impact energy on the sorption and diffusion of moisture in reinforced polymer composite samples on variation of their sizes // *Mechanics of Composite Materials*. 2018. Vol. 54. P. 145–154. DOI: 10.1007/s11029-018-9727-7.
16. Cavasin M., Sangermano M., Thomson B., Giannis S. Exposure of glass fiber reinforced polymer composites in seawater and the effect on their physical performance // *Materials*. 2019. Vol. 12. Paper 807. DOI: 10.3390/ma12050807.
17. Старцев О.В., Старцев В.О., Коган А.М., Варданян А.М. Изменение пластифицирующего воздействия влаги при климатическом старении полимерных композиционных материалов // *Деформация и разрушение материалов*. 2024. № 1. С. 16–26. DOI: 10.31044/1814-4632-2024-1-16-26.
18. Crank J. *The mathematics of diffusion*. 2nd ed. Oxford: Clarendon press, 1975. 414 p.
19. Carter H.G., Kibler K.G. Langmuir-type model for anomalous moisture diffusion in composite resins // *Journal Composite Materials*. 1978. Vol. 12. P. 118–131. DOI: 10.1177/002199837801200201.
20. Korkees F. Moisture absorption behavior and diffusion characteristics of continuous carbon fiber reinforced epoxy composites: a review // *Polymer-Plastics Technology and Materials*. 2023. Vol. 62. P. 1789–1822. DOI: 10.1080/25740881.2023.2234461.
21. Almudaihesh F., Holford K., Pullin R., Eaton M.A. Comparison study of water diffusion in uni-directional and 2D woven carbon/epoxy composites // *Polymer Composites*. 2022. Vol. 43. P. 118–129. DOI: 10.1002/pc.26361.
22. Althal S., Hossagadde P.N., Kini M.V., Pai D. Durability study of quasi-isotropic carbon/epoxy composites under various environmental conditions // *Iranian Polymer Journal*. 2023. Vol. 32. P. 873–885. DOI: 10.1007/s13726-023-01172-x.
23. Bone J.E., Sims G.D., Maxwell A.S. On the relationship between moisture uptake and mechanical property changes in a carbon fibre/epoxy composite // *Journal of Composite Materials*. 2022. Vol. 65. P. 2189–2199. DOI: 10.1177/00219983221091465.
24. Davies P., Le Gac P.Y., Le Gall M. Influence of sea water aging on the mechanical behavior of acrylic matrix composites // *Applied Composite Materials*. 2017. Vol. 24. P. 97–111. DOI: 10.1007/s10443-016-9516-1.
25. Du Y., Yu'e M.A., Wenbo S.U.N., Zhenhai W.A.N.G. Effect of hygrothermal aging on moisture diffusion and tensile behavior of CFRP composite laminates // *Chinese Journal of Aeronautics*. 2023. Vol. 36. P. 382–392. DOI: 10.1016/j.cja.2022.11.022.
26. Nandagopal R.A., Boay C.G., Narasimalu S. An empirical model to predict the strength degradation of the hygrothermal aged CFRP material // *Composite Structures*. 2020. Vol. 236. Art. 111876. DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.111876.
27. Arnold J.C., Alston S.M., Korkees F. An assessment of methods to determine the directional moisture diffusion coefficients of composite materials // *Composites: Part A*. 2013. Vol. 55. P. 120–128. DOI: 10.1016/j.compositesa.2013.08.012.
28. Korkees F., Morris E., Jarrett W., Swart R. Characterization of moisture absorption and flexural performance of functionalized graphene modified carbon fiber composites under low energy impact // *Polymer Composites*. 2023. Vol. 44. P. 3325–3340. DOI: 10.1002/pc.27324.

29. Loos A.C., Springer G.S. Moisture absorption of graphite-epoxy composites immersed in liquids and in humid air // *Journal of Composite Materials*. 1979. Vol. 13. P. 131–147. DOI: 10.1177/002199837901300205.
30. Mei J., Tan P.J., Liu J. Moisture absorption characteristics and mechanical degradation of composite lattice truss core sandwich panel in a hygrothermal environment // *Composites. Part A*. 2019. Vol. 127. Art. 105647. DOI: 10.1016/j.compositesa.2019.105647.
31. Scott P., Toumpanaki E., Lees J.M. Solution uptake in cylindrical carbon-fibre-reinforced polymer (CFRP) tendons // *Advances in Polymer Technology*. 2022. Vol. 2022. Art. 1981256. DOI: 10.17863/CAM.91288.
32. Gagani A., Krauklis A., Echtermeyer A.T. Anisotropic fluid diffusion in carbon fiber reinforced composite rods: Experimental, analytical and numerical study // *Marine Structures*. 2018. Vol. 59. P. 47–59. DOI: 10.1016/j.marstruct.2018.01.003.
33. Ryan J.M., Adams R., Brown S.G.R. Moisture ingress effect on properties of CFRP // *Proceedings of ICCM-17 – 17th International Conference on Composite Materials*. Edinburgh, United Kingdom. 2009. P. 1–10.
34. Revathi A., Sendil M.M., Shylaja S. et al. Effect of hot-wet conditioning on the mechanical and thermal properties of IM7/8552 carbon fiber composite // *Indian Journal of Advances in Chemical Science*. 2014. Vol. 2. P. 84–88.
35. Панин С.В., Старцев О.В., Кротов А.С. Диагностика начальной стадии климатического старения ПКМ по изменению коэффициента диффузии влаги // *Труды ВИАМ*. 2014. № 7. Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 11.06.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-7-9-9.
36. Старцев В.О., Славин А.В. Стойкость углепластиков и стеклопластиков на основе расплавных связующих к воздействию умеренно холодного и умеренно теплого климата // *Труды ВИАМ*. 2021. № 5 (99). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 21.06.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-5-114-126.
37. Kablov E.N., Startsev O.V., Krotov A.S., Kirillov V.N. Climatic aging of composite aviation materials: III. Significant aging factors // *Russian Metallurgy (Metally)*. 2012. Vol. 2012. No. 4. P. 323–329. DOI: 10.1134/S0036029512040040.
38. Heinrick M., Crawford B., Milani A.S. Degradation of fibreglass composites under natural weathering conditions // *MOJ Polymer Science*. 2017. Vol. 1. P. 18–24. DOI: 10.15406/mojps.2017.01.00004.
39. Nishizaki I., Kishima T., Sasaki I. Deterioration of mechanical properties of pultruded FRP through exposure tests // *Third International Conference on Durability & Field Applications of FRP Composites for Construction*. Quebec City, 2007. P. 159–166.
40. Nishizaki I., Sasaki I., Tomiyama T. Outdoor exposure tests of pultruded CFRP plates // *Proceeding of the 6th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering*. Calgary, Alberta, 2012. Art. 11-096.
41. Куцевич К.Е., Дементьева Л.А., Лукина Н.Ф. Свойства и назначение полимерных композиционных материалов на основе клеевых препрегов // *Труды ВИАМ*. 2016. № 8 (44). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 05.05.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-8-7-7.
42. Семенова Л.В., Нефедов Н.И., Белова М.В., Лаптев А.Б. Системы лакокрасочных покрытий для вертолетной техники // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № 4 (49). С. 56–61. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-4-56-61.
43. Старцев О.В., Болонин А.Б., Вапиров Ю.М., Владимирский В.Н., Офицерова М.Г. Улучшение вязкоупругих свойств акриловой эмали АС-1115 // *Лакокрасочные материалы и их применение*. 1986. № 4. С. 16–18.
44. Старцев В.О., Фролов А.С. Влияние климатического воздействия на цветовые характеристики лакокрасочных покрытий // *Лакокрасочные материалы и их применение*. 2015. № 3. С. 16–18.
45. Павлов А.В., Андреева Н.П., Павлов М.Р., Меркулова Ю.И. Климатические испытания лакокрасочного покрытия на основе фторопласта и особенности его деструкции // *Труды ВИАМ*. 2019. № 5 (77). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.07.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-5-103-110.
46. Yuan Z., Wang C., Jin L. A modified Langmuir model for moisture diffusion in UGFRE of composite insulator considering the composite degradation // *Polymers*. 2022. Vol. 14. Art. 2922. DOI: 10.3390/polym14142922.

47. Bystritskaya E.V., Pomerantsev A.L., Rodionova O.Y. Non-linear regression analysis: new approach to traditional implementations // *Journal of Chemometrics*. 2000. Vol. 14. P. 667–692.

References

1. Irving P., Soutis C. *Polymer composites in the aerospace industry*. Cambridge: 2nd ed. Woodhead Publishing, 2019, 688 p.
2. Startsev V.O., Antipov V.V., Slavin A.V., Gorbovets M.A. Modern domestic polymer composite materials for aviation industry (review). *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 2 (71), paper no. 10. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: March 14, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
3. Kablov E.N., Startsev V.O. Systematical analysis of the climatic influence on mechanical properties of the polymer composite materials based on domestic and foreign sources (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 2 (51), pp. 47–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-47-58.
4. Tomblin J., Salah L., Hoffman D. Durability and aging of composite aircraft structures. *Long-term durability of polymeric matrix composites*. Boston, MA: Springer, 2011, pp. 513–548.
5. *Aviation materials: a reference book in 13 vols*. Ed. E.N. Kablov. Moscow, 2015, vol. 13: Climatic and microbiological resistance of non-metallic materials, 270 p.
6. Kablov E.N., Startsev V.O., Laptev A.B. *Aging of polymer composite materials*. Moscow: National Research Center «Kurchatov Institute» – VIAM, 2023, 520 p.
7. Shershak P.V., Yakovlev N.O., Sutubalov A.I. Standards for testing polymer composite materials. Part 1. Tensile properties. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 3 (72), paper no. 12. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: April 25, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-152-166.
8. Shershak P.V., Sutubalov A.I., Yakovlev N.O., Sherstyuk F.A. Standards test methods for polymer matrix composite materials. Part 2. Compression properties. *Aviation materials and technologies*, 2024, no. 1 (74), paper no. 00. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: April 25, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-2-149-166.
9. Startsev O.V., Vapirov Y.M., Lebedev M.P., Kychkin A.K. Comparison of glass-transition temperatures for epoxy polymers obtained by methods of thermal analysis. *Mechanics of Composite Materials*, 2020, vol. 56, pp. 227–240. DOI: 10.1007/s11029-020-09875-5.
10. Startsev O.V., Anikhovskaya L.I., Litvinov A.A., Krotov A.S. Increasing the reliability of predicting the properties of polymer composite materials during thermal and humidity aging. *Doklady akademii nauk*, 2009, vol. 428, p. 56–60.
11. Kudo A., Ben G. Estimation of weatherability flexural properties for CFRP subjected to long-term outdoor exposure. *18th International Conference on Composite Materials*. Jeju, 2011, art. W27–3.
12. Yi L., Peng X.Q., Wang Q.F., Yang Y.X. Time-dependent deterioration of carbon fiber reinforced polymer affected by climatic factors. *Advanced Materials Research*, 2012, vol. 457–458, pp. 320–324.
13. Tao L., Min W., Qi L. The hygrothermal aging process and mechanism of CFRP papered by prepreg that may be stored at room temperature. *Polymer Degradation and Stability*, 2020, vol. 182, pp. 109395. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2020.109395.
14. Shvedkova A.K., Petrova A.P., Buznik V.M. Climate resistance of composite materials based on adhesive prepreps under arctic conditions. *Polymer Science. Ser.: D*, 2016, vol. 9, pp. 165–171. DOI: 10.1134/S1995421216020210.
15. Startsev V.O., Il'ichev A.V. Effect of mechanical impact energy on the sorption and diffusion of moisture in reinforced polymer composite samples on variation of their sizes. *Mechanics of Composite Materials*, 2018, vol. 54, pp. 145–154. DOI: 10.1007/s11029-018-9727-7.
16. Cavašin M., Sangermano M., Thomson B., Giannis S. Exposure of glass fiber reinforced polymer composites in seawater and the effect on their physical performance. *Materials*, 2019, vol. 12, paper 807. DOI: 10.3390/ma12050807.
17. Startsev O.V., Startsev V.O., Kogan A.M., Vardanyan A.M. Change in the plasticizing effect of moisture during climatic aging of polymer composite materials. *Deformatsiya i razrusheniye materialov*, 2024, no. 1, p. 16–26. DOI: 10.31044/1814-4632-2024-1-16-26.
18. Crank J. *The mathematics of diffusion*. 2nd ed. Oxford: Clarendon press, 1975. 414 p.
19. Carter H.G., Kibler K.G. Langmuir-type model for anomalous moisture diffusion in composite resins. *Journal Composite Materials*, 1978, vol. 12, pp. 118–131. DOI: 10.1177/002199837801200201.

20. Korkees F. Moisture absorption behavior and diffusion characteristics of continuous carbon fiber reinforced epoxy composites: a review. *Polymer-Plastics Technology and Materials*, 2023, vol. 62, pp. 1789–1822. DOI: 10.1080/25740881.2023.2234461.
21. Almudaihesh F., Holford K., Pullin R., Eaton M.A. Comparison study of water diffusion in unidirectional and 2D woven carbon/epoxy composites. *Polymer Composites*, 2022, vol. 43, pp. 118–129. DOI: 10.1002/pc.26361.
22. Althal S., Hossagadde P.N., Kini M.V., Pai D. Durability study of quasi-isotropic carbon/epoxy composites under various environmental conditions. *Iranian Polymer Journal*, 2023, vol. 32, pp. 873–885. DOI: 10.1007/s13726-023-01172-x.
23. Bone J.E., Sims G.D., Maxwell A.S. On the relationship between moisture uptake and mechanical property changes in a carbon fibre/epoxy composite. *Journal of Composite Materials*, 2022, vol. 65, pp. 2189–2199. DOI: 10.1177/00219983221091465.
24. Davies P., Le Gac P.Y., Le Gall M. Influence of sea water aging on the mechanical behavior of acrylic matrix composites. *Applied Composite Materials*, 2017, vol. 24, pp. 97–111. DOI: 10.1007/s10443-016-9516-1.
25. Du Y., Yu'e M.A., Wenbo S.U.N., Zhenhai W.A.N.G. Effect of hygrothermal aging on moisture diffusion and tensile behavior of CFRP composite laminates. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2023, vol. 36, pp. 382–392. DOI: 10.1016/j.cja.2022.11.022.
26. Nandagopal R.A., Boay C.G., Narasimalu S. An empirical model to predict the strength degradation of the hygrothermal aged CFRP material. *Composite Structures*, 2020, vol. 236, art. 111876. DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.111876.
27. Arnold J.C., Alston S.M., Korkees F. An assessment of methods to determine the directional moisture diffusion coefficients of composite materials. *Composites: Part A*, 2013, vol. 55, pp. 120–128. DOI: 10.1016/j.compositesa.2013.08.012.
28. Korkees F., Morris E., Jarrett W., Swart R. Characterization of moisture absorption and flexural performance of functionalized graphene modified carbon fiber composites under low energy impact. *Polymer Composites*, 2023, vol. 44, pp. 3325–3340. DOI: 10.1002/pc.27324.
29. Loos A.C., Springer G.S. Moisture absorption of graphite-epoxy composites immersed in liquids and in humid air. *Journal of Composite Materials*, 1979, vol. 13, pp. 131–147. DOI: 10.1177/002199837901300205.
30. Mei J., Tan P.J., Liu J. Moisture absorption characteristics and mechanical degradation of composite lattice truss core sandwich panel in a hygrothermal environment. *Composites. Part A*, 2019, vol. 127, art. 105647. DOI: 10.1016/j.compositesa.2019.105647.
31. Scott P., Toumpanaki E., Lees J.M. Solution uptake in cylindrical carbon-fibre-reinforced polymer (CFRP) tendons. *Advances in Polymer Technology*, 2022, vol. 2022, art. 1981256. DOI: 10.17863/CAM.91288.
32. Gagani A., Krauklis A., Echtermeyer A.T. Anisotropic fluid diffusion in carbon fiber reinforced composite rods: Experimental, analytical and numerical study. *Marine Structures*, 2018, vol. 59, pp. 47–59. DOI: 10.1016/j.marstruct.2018.01.003.
33. Ryan J.M., Adams R., Brown S.G.R. Moisture ingress effect on properties of CFRP. *Proceedings of ICCM-17 – 17th International Conference on Composite Materials*. Edinburgh, United Kingdom, 2009, pp. 1–10.
34. Revathi A., Sendil M.M., Shylaja S. et al. Effect of hot-wet conditioning on the mechanical and thermal properties of IM7/8552 carbon fiber composite. *Indian Journal of Advances in Chemical Science*, 2014, vol. 2, pp. 84–88.
35. Panin S.V., Startsev O.V., Krotov A.S. Initial stage environmental degradation of the polymer matrix composites evaluated by Water diffusion coefficient. *Trudy VIAM*, 2014, no. 7, paper no. 09. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: June 11, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-7-9-9.
36. Startsev V.O., Slavin A.V. Carbon and glass reinforced polymer based on solventfree binders resistance to the impact of a moderate cold and moderate warm climate. *Trudy VIAM*, 2021, no. 5 (99), paper no. 12. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: June 21, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-5-114-126.
37. Kablov E.N., Startsev O.V., Krotov A.S., Kirillov V.N. Climatic aging of composite aviation materials: III. Significant aging factors. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2012, vol. 2012, no. 4, pp. 323–329. DOI: 10.1134/S0036029512040040.

38. Heinrick M., Crawford B., Milani A.S. Degradation of fibreglass composites under natural weathering conditions. *MOJ Polymer Science*, 2017, vol. 1, pp. 18–24. DOI: 10.15406/mojps.2017.01.00004.
39. Nishizaki I., Kishima T., Sasaki I. Deterioration of mechanical properties of pultruded FRP through exposure tests. *Third International Conference on Durability & Field Applications of FRP Composites for Construction*. Quebec City, 2007, pp. 159–166.
40. Nishizaki I., Sasaki I., Tomiyama T. Outdoor exposure tests of pultruded CFRP plates. *Proceeding of the 6th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering*. Calgary, Alberta, 2012, art. 11-096.
41. Kutsevich K.E., Dementeva L.A., Lukina N.F. Properties and application of polymer composite materials based on glue prepregs. *Trudy VIAM*, 2016, no. 8, paper no. 7. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 05, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-8-7-7.
42. Semenova L.V., Nefedov N.I., Belova M.V., Laptev A.B. Systems of paint coatings for helicopter equipment. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. 4 (49), pp. 56–61. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-4-56-61.
43. Startsev O.V., Bolonin A.B., Vapirova Yu.M., Vladimirovsky V.N., Ofitserova M.G. Improving the viscoelastic properties of acrylic enamel AC-1115. *Lakokrasochnyye materialy i ikh primeneniye*, 1986, no. 4, pp. 16–18.
44. Startsev V.O., Frolov A.S. Influence of climatic exposure on the color characteristics of paint and varnish coatings. *Lakokrasochnyye materialy i ikh primeneniye*, 2015, no. 3, pp. 16–18.
45. Pavlov A.V., Andreeva N.P., Pavlov M.R., Merkulova Yu.I. Climatic tests of paint coating based on fluoroplastic and features of its destruction. *Trudy VIAM*, 2019, no. 5, paper no. 12. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 01, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-5-103-110.
46. Yuan Z., Wang C., Jin L. A modified Langmuir model for moisture diffusion in UGFRE of composite insulator considering the composite degradation. *Polymers*, 2022, vol. 14, art. 2922. DOI: 10.3390/polym14142922.
47. Bystritskaya E.V., Pomerantsev A.L., Rodionova O.Y. Non-linear regression analysis: new approach to traditional implementations. *Journal of Chemometrics*, 2000, vol. 14, pp. 667–692.

Информация об авторах

Старцев Олег Владимирович, старший научный сотрудник, д.т.н., ВИАМ – НИЦ «Курчатовский институт», admin@viam.ru; и.о. директора ИФТПС СО РАН, administration@iptpn.ysn.ru

Коваль Татьяна Васильевна, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Кротов Анатолий Сергеевич, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н., ИФТПС СО РАН, e-mail: administration@iptpn.ysn.ru

Двирная Елена Вячеславовна, техник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru
Велигодский Илья Михайлович, старший научный сотрудник, к.х.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Oleg V. Startsev, Senior Researcher, Doctor of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM; Acting Director, V.P. Larionov Institute of the Physical-Technical Problems of the North, SB RAS Federal state Budgetary Institution of Science, administration@iptpn.ysn.ru

Tatiana V. Koval, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Anatoliy S. Krotov, Senior Researcher, Candidate of Sciences (Phys. & Math.), V.P. Larionov Institute of the Physical-Technical Problems of the North, SB RAS Federal state Budgetary Institution of Science, administration@iptpn.ysn.ru

Elena V. Dvirnaya, Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Ilya M. Veligodsky, Senior Researcher, Candidate of Sciences (Chem.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 29.08.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 11.09.2024.
 The article was submitted 29.08.2024; approved and accepted for publication after reviewing 11.09.2024.



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»

Всероссийский научно-исследовательский институт
авиационных материалов



НИЦ «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ» – ВИАМ

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР



- Реализует полный инновационный цикл – от фундаментальных и прикладных исследований до создания высокотехнологичных наукоемких производств по выпуску материалов нового поколения, полуфабрикатов и уникального технологического оборудования.
- Разрабатывает и поставляет широкую номенклатуру металлических и неметаллических материалов, покрытий, технологических процессов и оборудования, методов и средств защиты от коррозионных поражений и биоповреждений с возможностью осуществления поставки продукции под контролем ВП МО РФ.

На основании одобренного Президентом Российской Федерации В.В. Путиным принципа создания отрасли малотоннажных производств в материаловедческих НИИ и ГНЦ в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ создано:

25 высокотехнологичных
наукоемких производств по выпуску
253 наименований материалов
и полуфабрикатов

ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ ЦЕНТР

- Включает 19 комплексов уникальной стендовой и испытательной базы.
- Проводит более 1000 видов исследований и испытаний на 1100 единицах исследовательского и испытательного оборудования.
- Аккредитован в качестве технически компетентного центра Росавиацией, Росаккредитацией, Российским морским регистром судоходства, Филиалом ФГБУ «46 ЦНИИ» Минобороны России, признан компанией Snecma группы SAFRAN.
- Включен в международную сеть станций климатических испытаний Atlas Material Testing Technology LLC.



национальная
система
аккредитации
инфраструктура
доверия



SAFRAN
Snecma



Ульяновский научно-технологический центр ВИАМ –
НИЦ «Курчатовский институт»



Разработка технологий и производство
полуфабрикатов и изделий из ПКМ.

Геленджикский центр климатических
испытаний ВИАМ им. Г.В. Акимова –
НИЦ «Курчатовский институт»



Единственный в России соответствующий международным
стандартам центр климатических испытаний материалов,
средств защиты от коррозии, старения и биоповреждений
при одновременном воздействии нагрузок и коррозионной среды.

Воскресенский экспериментально-технологический
центр по специальным материалам ВИАМ –
НИЦ «Курчатовский институт»



Разработка технологий и производство бериллийсодержащих
сплавов, полимерных связующих, препрегов, материалов
для безэховых камер.

Россия, 105005, г. Москва, ул. Радио, д. 17
Телефон: +7 (499) 261-86-77, факс: +7 (499) 267-86-09

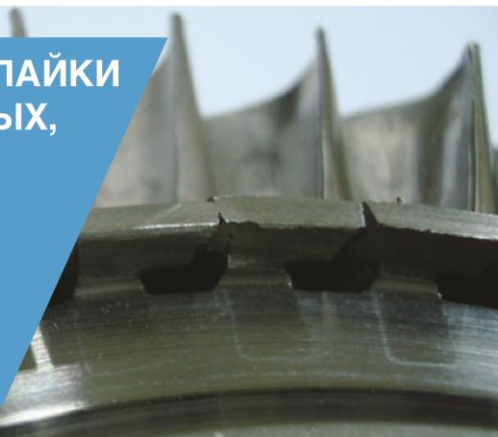
на правах рекламы

E-mail: admin@viam.ru
www.viam.ru



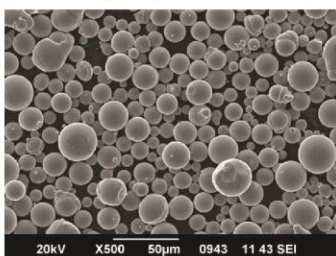
ПАЙКА КОНСТРУКЦИОННЫХ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ РЕМОНТ ДЕТАЛЕЙ МЕТОДОМ ПАЙКИ

РАЗРАБОТКА ПРИПОЕВ И ТЕХНОЛОГИЙ ПАЙКИ
НИКЕЛЕВЫХ ЖАРОПРОЧНЫХ, ТИТАНОВЫХ,
МЕДНЫХ СПЛАВОВ И СТАЛЕЙ
В ОДНОИМЕННОМ И РАЗНОИМЕННОМ
СОЧЕТАНИЯХ, ТЕХНОЛОГИЙ ПАЙКИ
РАЗЛИЧНЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ
МАТЕРИАЛОВ И СЛОЖНЫХ
КОНСТРУКЦИЙ.

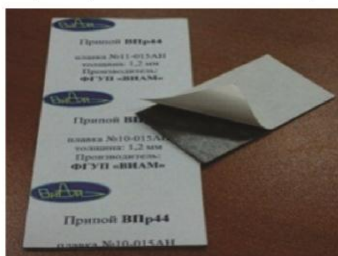


ТЕХНОЛОГИИ ПАЙКИ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ И РЕМОНТЕ ГТД: НИКЕЛЕВЫЕ ЖАРОПРОЧНЫЕ И ТИТАНОВЫЕ ПРИПОИ:

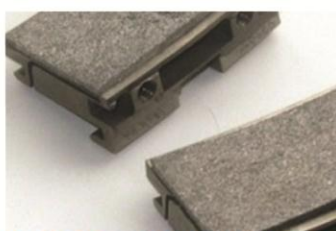
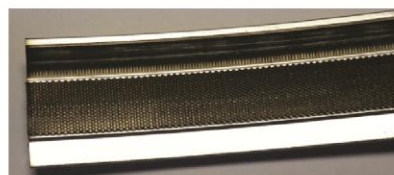
- прочность паяных соединений на уровне 0,7–0,95 от прочности соединяемых материалов;
- совмещение режима пайки с режимом термообработки основного материала.



- сферическая форма гранул;
- низкое содержание кислорода (менее 0,010%).



- Припои на органическом связующем
в виде самоклеящихся лент:
- срок хранения 12 месяцев;
 - толщина – от 0,5 до 5 мм;
 - надежная фиксация на изделии.



НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ПРИПОИ:

- прочность паяных соединений в 1,5–2,5 раза выше по сравнению с оловянно-свинцовыми припоями;
- коррозионная стойкость в 2–4 раза выше по сравнению с оловянно-свинцовыми припоями.

МЫ СЕРИЙНО ПРОИЗВОДИМ И ПОСТАВЛЯЕМ ПРИПОИ МАРОК:

- титановые – ВПр16, ВПр28;
- никелевые – ВПр7, ВПр11, ВПр24, ВПр27, ВПр36, ВПр42, ВПр44, ВПр50;
- низкотемпературные – ВПр35, ВПр40;
- медно-никелевые – ВПр1, ВПр4.



СВАРКА КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ РЕМОНТ ДЕТАЛЕЙ МЕТОДОМ СВАРКИ

ИССЛЕДОВАНИЕ СВАРИВАЕМОСТИ
АЛЮМИНИЕВЫХ, НИКЕЛЕВЫХ,
ТИТАНОВЫХ, МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ
И СТАЛЕЙ, РАЗРАБОТКА
СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
СВАРКИ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ
ДОСТИЖЕНИЕ ВЫСОКИХ
ХАРАКТЕРИСТИК СОЕДИНЕНИЯ.



Комплекс электронно-лучевой
сварки на базе установки
АЭЛТК-11-486

5 000 образцов
в год
до 1 000 валов
в год



до 5 000
типовых образцов
в год

Роботизированный технологический
комплекс лазерной гибридной
сварки Laser Weld 8R60

Комплекс дуговой сварки
на базе EWM415

до 2 000 образцов
в год



до 1 500 образцов
в год

Ротационная сварка
трением

МЫ ПРЕДЛАГАЕМ:

- разработку технологий сварки плавлением (автоматическая аргоно-дуговая сварка (ААрдЭС), лазерная сварка (ЛС), электронно-лучевая сварка (ЭЛС), гибридная сварка (ГС) и др.) современных конструкционных материалов;
- разработку технологий сварки в твердой фазе: сварка трением с перемешиванием (СТП), ротационная сварка трением (РСТ), полуфабрикатов из алюминиевых, никелевых, титановых сплавов и сталей;
- разработку технологий ремонта деталей методом сварки;
- трансфер технологий для различных отраслей промышленности.

Россия, 105005, г. Москва, ул. Радио, д. 17
Телефон: +7 (499) 261-86-77, факс: +7 (499) 267-86-09

на правах рекламы

E-mail: admin@viam.ru
www.viam.ru



СОПЛА ДЛЯ РАСПЫЛЕНИЯ РАСПЛАВЛЕННЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ И КЕРАМИЧЕСКИЕ ЭМИТТЕРЫ

ВЫПУСКАЮТСЯ КЕРАМИЧЕСКИЕ СОПЛА ШИРОКОГО РЯДА ТИПОРАЗМЕРОВ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ПРИ РАСПЫЛЕНИИ РАСПЛАВЛЕННЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ, И КЕРАМИЧЕСКИЕ ЭМИТТЕРЫ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ПРОЦЕССОВ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКИ



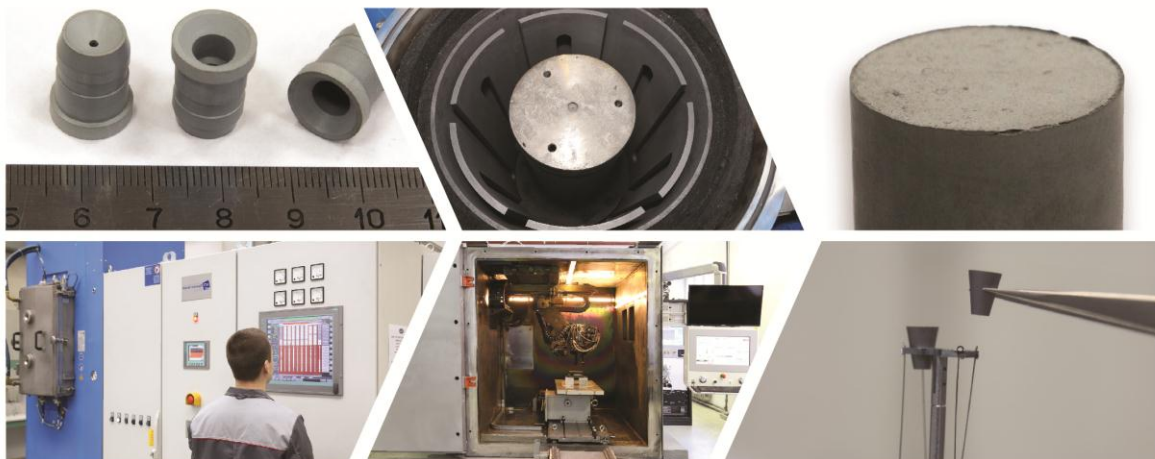
Производственные мощности

130 кг

керамического композиционного материала в год

5000 шт. сопел в год

1 500 – 2 000 шт. катодов в год



МЫ ПРЕДЛАГАЕМ:

- разработку составов и технологий изготовления керамических материалов конструкционного и функционального назначения;
- керамический композиционный материал ВМК-17;
- сопла из ВМК-17 диаметром от 12 до 36 мм и высотой от 16 до 90 мм;
- керамические эмиттеры 4,7 мм и толщиной 1,5 мм;
- керамические эмиттеры диаметром 6,0 мм и толщиной 1,5 мм;
- керамические эмиттеры сложной формы по чертежам заказчика.

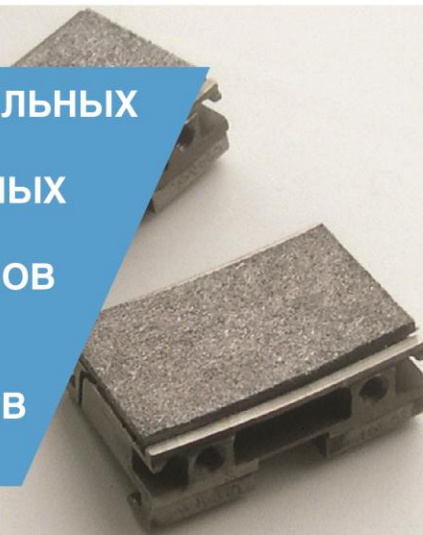
Россия, 105005, г. Москва, ул. Радио, д. 17
Телефон: +7 (499) 261-86-77, факс: +7 (499) 267-86-09

на правах рекламы

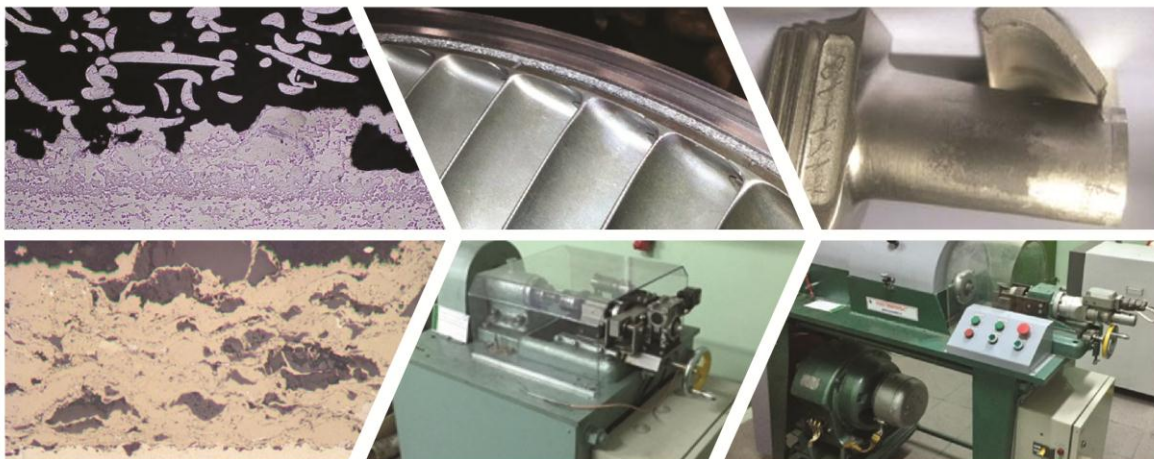
E-mail: admin@viam.ru
www.viam.ru

УПЛОТНИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ГТД

РАЗРАБОТКА ЭФФЕКТИВНЫХ УПЛОТНИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ГТД – ИСТИРАЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ СТАТОРНЫХ ДЕТАЛЕЙ КОМПРЕССОРА И ТУРБИНЫ, АБРАЗИВНО-ИЗНОСОСТОЙКИХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ТОРЦОВ РАБОЧИХ ЛОПАТОК. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ УПЛОТНИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ ТРЕНИЯ.



- разработка и исследование эксплуатационных свойств уплотнительных материалов проточной части ГТД – истираемых материалов для статорных деталей компрессора и турбины, абразивно-износостойких материалов для торцов рабочих лопаток;
- разработка уплотнительных материалов и технологий их нанесения на детали ГТД;
- изготовление опытных партий истираемых уплотнительных элементов на основе металлических волокон;
- исследование эксплуатационных характеристик уплотнительных материалов проточной части (проведение комплекса исследований и испытаний, позволяющих дать оценку эффективности применения истираемых и абразивно-износостойких материалов турбины и компрессора ГТД).



МЫ ПРЕДЛАГАЕМ:

- разработку уплотнительных материалов по техническому заданию;
- проведение исследований эксплуатационных характеристик уплотнительных материалов с выдачей заключения;
- совместные работы по опробованию новых уплотнительных материалов в изделиях заказчика.



УЛЬЯНОВСКИЙ НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ЦЕНТР ВИАМ – НИЦ «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»

ОДНО ИЗ ВЕДУЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ УЛЬЯНОВСКОЙ
ОБЛАСТИ ПО РАЗРАБОТКЕ ИННОВАЦИОННЫХ
ТЕХНОЛОГИЙ.

ПРОИЗВОДИТ ПОЛУФАБРИКАТЫ И ИЗДЕЛИЯ
ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ
МАТЕРИАЛОВ.



Производственные
мощности:

40 т	растворных связующих в год	25 т	расплавных связующих в год	100 м ²	формообразующих оснасток
50 000	пог.м	препрегов на основе растворных связующих	30 000	шт	листов стекло- и оргопластиков
500 000	пог.м	клеевых препрегов марки КМКС	350 000	пог.м	препреги нового поколения
1 200	шт	заготовок панелей пола	20 т	заготовок изделий из ПКМ	

УНТЦ выпускает широкую номенклатуру материалов, полуфабрикатов и изделий из ПКМ на высоком научно-техническом уровне.



МЫ ПРЕДЛАГАЕМ:

- клеевые препреги;
- препреги на основе расплавных связующих;
- клеевые пленки;
- заготовки панелей пола;
- заготовки обтекателей;
- заготовки гибких и жестких патрубков для СКВ ЛА;
- процессинг изготовления продукции на основе давальческих материалов;
- препреги на основе стеклотканей и полимерных связующих;
- препреги на основе углеродных тканей;
- полимерные связующие;
- листовой органопластик;
- формообразующие оснастки из ПКМ;
- листовой органопластик
- изделия из ПКМ по согласованию с заказчиком;
- дополнительное профессиональное образование «Технология ремонта изделий из ПКМ».

Россия, 105005, г. Москва, ул. Радио, д. 17
Телефон: +7 (499) 261-86-77, факс: +7 (499) 267-86-09

на правах рекламы

E-mail: admin@viam.ru
www.viam.ru; untc.viam.ru





ВОСКРЕСЕНСКИЙ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ЦЕНТР ВИАМ – НИИ «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»

УНИКАЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЦЕНТР ПО ОБРАБОТКЕ БЕРИЛЛИЯ И БЕРИЛЛИЙСОДЕРЖАЩИХ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ, С ЗАМКНУТЫМ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИМ ЦИКЛОМ ПРОИЗВОДСТВА.

НА ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЩАДЯХ ВЭТЦ ВИАМ ТАКЖЕ СОЗДАНЫ УЧАСТКИ ПО ИЗГОТОВЛЕНИЮ СПЕЦИАЛЬНЫХ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ.

Производственные мощности:

29 т бериллийсодержащие стали и сплавы в год

209 единиц технологического и исследовательского оборудования

10 т препрегов ПКМ в год

7700 м²

площадь производственных помещений

13 производственных участков



МЫ ПРЕДЛАГАЕМ:

- изготовление пластин и дисков бериллиевых герметичных, фольги бериллиевой вакуум-плотной радиационно-прозрачной повышенной чистоты толщиной от 10 мкм; паяных бериллиевых окон для рентгеновской техники; полуфабрикатов и изделий из бериллия по чертежам заказчика;
- нанесение гальванических и комплексных защитных покрытий на изделия из бериллия;
- выплавку сплавов ВНС-32 и 97НЛ-ВИ, алюминий-бериллиевой лигатуры АБ-1 и АБ-2, медно-бериллиевой лигатуры МБ-1 и МБ-2;
- изготовление прутков диаметром 12–60 мм из жаропрочной бериллийсодержащей коррозионностойкой стали марки ВНС-32-ВИ, ленты из бериллийсодержащего сплава 97НЛ-ВИ;
- изготовление клеев и клеевых связующих: ВСЭ-1212, ВСП-3М, ВСК-14-2МР, ВСК-14-2М, ВСВ-43, ВСЭ-34, ВСЭ-37, ВСЭ-33, ВПБ-45, ВСЭ-39, РСФ-250, ВСК-14-3, ВСК-14-4М;
- изготовление препрегов ПКМ шириной 300 и 1000 мм: ПУ-4э-2м, СТ-ВПС-33, ЭНФБ-2М, СТП-97с, СТ-69Н, СТ-69Н-14;
- изготовление углеродных тканых наполнителей полотняного и саржевого переплетения шириной 1000 мм для ПКМ: ВТКУ-2.200, ВТКУ-2.280, ВТКУ-3, ВТКУ-2.200Т;
- изготовление котонизированного льняного волокна, целлюлозного волокна, химическая модификация целлюлозы, формирование сверхлегких смесевых материалов на основе кварцевого и базальтового волокон с применением котонизированного льняного волокна, приготовление и иглопробивная обработка смеси высокотемпературных оксидных волокон и котонизированного льняного волокна, изготовление прекурсоров оксида циркония ОХЦ-В, оксида алюминия.

Россия, 105005, г. Москва, ул. Радио, д. 17
Телефон: +7 (499) 261-86-77, факс: +7 (499) 267-86-09

на правах рекламы

E-mail: admin@viam.ru
www.viam.ru; vetc.viam.ru





ГЕЛЕНДЖИКСКИЙ ЦЕНТР КЛИМАТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ ВИАМ ИМ. Г.В. АКИМОВА – НИЦ «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»

ЕДИНСТВЕННЫЙ В РФ ЦЕНТР КЛИМАТИЧЕСКИХ
ИСПЫТАНИЙ, АККРЕДИТОВАННЫЙ ФЕДЕРАЛЬНЫМ
АГЕНТСТВОМ ВОЗДУШНОГО ТРАНСПОРТА
(РОСАВИАЦИЯ), ВХОДЯЩИЙ
В МЕЖДУНАРОДНУЮ СЕТЬ СТАНЦИЙ
КЛИМАТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ
ATLAS MATERIAL TESTING TECHNOLOGY LLC.



Основные
показатели:

2118 м²

площадь лабораторно-
исследовательского
корпуса

>100

единиц испытательного
и исследовательского
оборудования

1100 м²

площадь атмосферного
испытательного полигона

200 м²

площадь
силового пола

Центр климатических испытаний расположен в приморской атмосфере умеренно теплого климата с мягкой зимой (ГОСТ 16350) с коррозионной агрессивностью атмосферы (9 баллов по ГОСТ 9.039 и C3-C5 по ISO 9223)

Атмосферный испытательный полигон:

Открытая площадка –
до 10000
образцов одновременно



Площадка под навесом –
до 1000
образцов одновременно



Силовой пол с нагрузкой
до 500 мПа



Площадка для испытаний
узлов и конструкций –
288 м²



Испытания при совместном воздействии
климатических факторов,
статических и циклических нагрузок

Метеостанция,
работающая в непрерывном
автоматическом режиме



Лабораторные исследования:



Физико-механические
испытания



Исследования методами
неразрушающего контроля



Металлофизические
исследования



Химико-аналитические
исследования



Исследования теплофизических
свойств



Электрохимия
и исследования покрытий



Испытания при повышенной
температуре и влаге



Испытания при повышенных и пониженных
температурах, а также при их знако-
переменном воздействии



Испытания в коррозионно-
активных средах



Испытания и исследования
систем защиты

МЫ ПРЕДЛАГАЕМ:

- натурные испытания металлических и неметаллических материалов, систем защиты, конструкций, в том числе при совместном воздействии механических нагрузок и климатических факторов;
- полный комплекс лабораторных испытаний и исследований материалов, элементов конструкций, а также систем защиты;
- разработку, подбор, отработку методов и средств защиты от коррозии, старения и биоповреждений для металлических и неметаллических материалов, конструкций и изделий;
- установление сроков службы материалов в предполагаемых условиях эксплуатации.

Россия, 105005, г. Москва, ул. Радио, д. 17
Телефон: +7 (499) 261-86-77, факс: +7 (499) 267-86-09

на правах рекламы

E-mail: admin@viam.ru
www.viam.ru; gcki.viam.ru



ТРЕБОВАНИЯ К РУКОПИСИ СТАТЬИ ПРИ ПОДГОТОВКЕ К ИЗДАНИЮ

1. Рукопись предоставляется в Редакционно-издательский отдел НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ на бумажном и электронном носителях (программное обеспечение не ниже Windows'2003).

2. На рукопись должно быть оформлено Экспертное заключение о возможности опубликования в открытой печати.

3. Рукопись должна быть подписана всеми авторами статьи.

4. К каждой рукописи на отдельной странице на русском и английском языках предоставляется реферат (объемом 500–600 знаков, включая пробелы), в котором кратко излагается основное содержание работы, и ключевые слова.

5. Фамилии авторов и название статьи должны иметь перевод на английский язык.

6. К рукописи должен быть приложен список авторов с указанием фамилии, имени, отчества (полностью), должности, номера телефона и адреса электронной почты.

7. Рекомендуются следующая структура рукописи:

- заголовок статьи;
- сведения об авторах;
- реферат;
- ключевые слова;
- введение;
- материалы и методы;
- результаты;
- обсуждение и заключения;
- благодарности (при необходимости);
- список литературы.

8. Рекомендуемый объем рукописи от – 15 000 до 30 000 знаков, включая пробелы.

9. Основные технические параметры рукописи:

- шрифт – Times New Roman;
- размер шрифта – 12;
- интервал – 1,5;
- поля: верхнее – 2; нижнее – 2,5; левое – 2,5; правое – 2,5;
- автоматическая расстановка переносов;
- набор формул в Microsoft Equation 3.0;
- штриховые рисунки должны быть выполнены в программе Microsoft Power Point или Microsoft Excel. На каждый рисунок должна быть ссылка в тексте;
- микроструктуры, фотографии приборов, оборудования должны быть представлены в электронном виде в программе Photoshop JPEG;
- размер иллюстраций не должен превышать формат А4;
- таблицы должны быть выполнены в программе Microsoft Word, пронумерованы и иметь тематические заголовки. На каждую таблицу должна быть ссылка в тексте;
- единицы измерения физических величин должны быть приведены в системе СИ.

10. Форма подачи рукописи:

- текст на бумажном носителе и в электронном виде отдельным файлом;
- пронумерованные рисунки на бумажном носителе и в электронном виде отдельными файлами;
- пронумерованные подписи к рисункам на бумажном носителе и в электронном виде отдельным файлом.

11. Список литературы, завершающий рукопись, должен быть тщательно выверен и унифицирован в соответствии с ГОСТ 7.0.5–2008.

Список литературы должен включать не менее 15 источников.

Последовательность ссылок в тексте должна строго соответствовать последовательности приведенного списка литературы.

Ссылки на неопубликованные работы (отчеты научно-исследовательских учреждений и заводов, стандарты предприятия и т. п.) не допускаются.

Допускается не более одной ссылки на работы, принятые к печати, с указанием номера издания, в котором планируется публикация.

Соблюдение данных правил облегчает работу научного редактора, рецензента и редактора, ускоряет подготовку статьи к печати.

По рекомендации научного редактора или рецензента статья может быть направлена авторам на доработку. После доработки авторы должны представить в редакцию первоначальный и доработанный варианты статьи с ответами на все вопросы и замечания научного редактора или рецензента.

Статья, находящаяся на доработке у авторов более одного месяца, рассматривается и принимается к публикации как вновь поступившая.

ТРУДЫ ВИАМ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Россия, 105005, г. Москва, ул. Радио, д. 17
Телефон: +7 (499) 261-86-77, факс: +7 (499) 267-86-09
E-mail: admin@viam.ru
www.ВИАМ.РФ; www.viam.ru